ECOLE NATIONALE VETERINAIRE DE TOULOUSE

ANNEE : 1982

THESE : 60

LES ALGUES SPIRULINES

THESE

Pour le Doctorat Vétérinaire
(Diplôme d'Etat)
Présentée et soutenue publiquement en 1982
devant l'Université Paul Sabatier de Toulouse

par

Rémi, Jean, Simon GUERRIN

Né le 29 avril 1954 à POISSY (Yvelines)

Membres du Jury

Président : ..... Monsieur ECALLE
Professeur à l'Université Paul Sabatier de Toulouse

Assesseurs : ..... Monsieur FALIU
Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse

Monsieur CABANIE
Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse

UTRECHT
LEIDEN
1876

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41547627_0030

ECOLE NATIONALE VETERINAIRE DE TOULOUSE

ANNEE : 1982 THESE : 60

LES ALGUES SPIRULINES

THESE

Pour le Doctorat Vétérinaire
(Diplôme d'Etat)
Présentée et soutenue publiquement en 1982
devant l'Université Paul Sabatier de Toulouse

par

Rémi, Jean, Simon GUERRIN

Né le 29 avril 1954 à POISSY (Yvelines)

Membres du Jury

Président : ..... Monsieur ECALLE
Professeur à l'Université Paul Sabatier de Toulouse

Assesseurs : ..... Monsieur FALIU
Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse

Monsieur CABANIE
Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse

MINISTERE DE L'AGRICULTURE

ECOLE NATIONALE VETERINAIRE DE TOULOUSE

ecteur : ..... M.LAUTIE
ecteur honoraire : ..... M. FLORIO
ofesseurs honoraires : ..... M. BRIZARD
..... M. SAURAT

PERSONNEL ENSEIGNANT
CHAIRE DE PHARMACIE ET TOXICOLOGIE

ofesseur titulaire ..... M. GODFRAIN
ofesseur sans chaire ..... Mme BURGAT-SACAZE

Pharmacie et Toxicologie

CHAIRE DE PHYSIQUE ET CHIMIE BIOLOGIQUES ET MEDICALES

ofesseur titulaire ..... M. RICO
ofesseur sans chaire ..... M. BRAUN
aître Assistant ..... M. BENARD

Physique Biologique et Médicale
Chimie Biologique et Médicale
Informatique biologique et médicale

CHAIRE D'ANATOMIE DES ANIMAUX DOMESTIQUES

ofesseur titulaire ..... M. PAVAUX
aître Assistant ..... M. LIGNEREUX
aître Assistant ..... M. SAUTET

Organogénèse - Tératologie
Anatomie Générale - Anatomie Appliquée

CHAIRE DE PHYSIOLOGIE, PHARMACODYNAMIE ET THERAPEUTIQUE

ofesseur titulaire ..... M. RUCKEBUSCH
ofesseur sans chaire ..... M. FARGEAS
aître Assistant Agrégé ..... M. TOUTAIN

Physiologie - Pharmacodynamie - Thérapeutique

CHAIRE D'HISTOLOGIE - ANATOMIE PATHOLOGIQUE

ofesseur titulaire ..... M. VAN HAVERBEKE
ofesseur sans chaire ..... M. CABANIE
aître Assistant Agrégé ..... M. MAGNOL

Histologie - Embryologie
Anatomie Pathologique - Clinique

CHAIRE D'HYGIENE ET INDUSTRIE DES ALIMENTS D'ORIGINE ANIMALE

ofesseur titulaire ..... M. LABIE
aître de Conférences ..... M. EECKHOUTTE
aître Assistant Agrégé ..... Mme BENARD

Hygiène - Inspection - Contrôle et Technologie des denrées alimentaires d'origine animale - Clinique

CHAIRE DE PARASITOLOGIE ET MALADIES PARASITAIRES

ofesseur titulaire ..... M. DORCHIES
aître de Conférences ..... M. FRANC
aître Assistant ..... M. DUCOS DE LAHITTE

Zoologie appliquée - Ecologie - Parasitologie externe -
Dermatologie - Parasitologie interne - Clinique

CHAIRE DE SEMIOLOGIE ET PATHOLOGIE MEDICALE
DES EQUIDES ET CARNIVORES ET DE LEGISLATION

Professeur titulaire ..... M. LESCURE
Maître de Conférences ..... M. GUELFI
Maître Assistant ..... M. REGNIER

Sémiologie et Pathologie Médicale des Equidés et Carnivores
Législation Vétérinaire et Déontologie Clinique

CHAIRE DE PATHOLOGIE MEDICALE DU BETAIL
ET DES ANIMAUX DE BASSE-COUR

Professeur titulaire ..... M. TOURNUT
Maître de Conférences ..... M. BEZILLE
Maître Assistant ..... M. JOUGLAR

Sémiologie et Pathologie Médicale du bétail et des animaux de basse-cour
Clinique - Consultation itinérante

CHAIRE DE PATHOLOGIE CHIRURGICALE

Professeur titulaire ..... M. CAZIEUX
Maître de Conférences ..... M. GENEVOIS
Maître-Assistant ..... M. AUTEFAGE
Maître-Assistant ..... M. FAYOLLE

Propédeutique et Sémiologie Chirurgicale - Radiologie - Technique Chirurgicale - Anesthésiologie
Pathologie Chirurgicale - Clinique - Traumatologie - Podologie orthopédique

CHAIRE DE PATHOLOGIE DE LA REPRODUCTION

Professeur titulaire ..... M. FERNEY
Professeur sans chaire ..... M. ROYAL

Pathologie de l'appareil génital et de la mamelle - Sémiologie et Propédeutique - Pathologie de la Reproduction - Obstétrique et pathologie du nouveau-né - Clinique - Consultation itinérante

CHAIRE DE MALADIES CONTAGIEUSES - ZOONOSES -
LEGISLATION SANITAIRE

Professeur titulaire ..... M. CHANTAL
Maître Assistant ..... M. PICAVET

Epidémiologie - Maladies contagieuses - Zoonoses
Législation Sanitaire - Clinique

CHAIRE DE PATHOLOGIE GENERALE - MICROBIOLOGIE - IMMUNOLOGIE

Professeur titulaire ..... M. LAUTIE
Maître Assistant ..... M. PELLERIN
Maître Assistant ..... M. MILON

Microbiologie - Immunologie - Pathologie Générale

CHAIRE D'ELEVAGE ET ECONOMIE

Professeur titulaire ..... M. QUEINNEC
Professeur sans chaire ..... M. DARRE
Maître Assistant ..... Mme QUEINNEC

Ethnologie - Génétique animale - Extérieur - Zootechnie et Economie générales - Ethologie appliquée, Sciences, Techniques, Economie de l'Elevage et des Productionsanimales
Insémination artificielle - Organisation de l'Elevage

CHAIRE D'ALIMENTATION

Professeur titulaire ..... M. FALIU
Professeur sans chaire ..... M. GRIESS
Maître Assistant ..... M. ENJALBERT

Botanique appliquée et Bromatologie - Agronomie - Alimentation

CHARGES D'ENSEIGNEMENT

MM. les Professeurs : ANGELIER, ARMENGAUD, COMBES, COMBRET, CROS, FERNET, et MAZENC.

La Faculté et l'Ecole déclarent n'être pas responsable des opinions émises par les candidats
(Délibération de la Faculté en date du 10 mai 1891 et du Conseil de l'Ecole en date du 13 juin 1924).

A NOTRE PRESIDENT DE THESE :

Monsieur le Professeur ECALLE
de l'Université Paul Sabatier de TOULOUSE

Qui nous fait l'honneur de présider le jury de notre thèse.

Hommage respectueux.

A NOTRE JURY DE THESE :

Monsieur le Professeur FALIU

de l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

Qui nous a guidé dans ce travail avec efficacité et nous a toujours conseillé et accueilli avec patience.

Toute notre sincère reconnaissance.

Monsieur le Professeur CABANIE

de l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

Qui a accepté de participer au jury de notre thèse.

Sincères remerciements.

A Monsieur Maurice LENGELLE.

Administrateur général à l'O.C.D.E.

Qui a su attirer notre attention sur les sources de protéines non conventionnelles.

Sincères remerciements.

A Mademoiselle Geneviève CLEMENT.

De l'Institut Français du Pétrole.

Qui nous a toujours accueilli avec gentillesse et compréhension.

Avec toute notre reconnaissance.

A MES AMIS FRANCAIS ET ETRANGERS,

AUX PRATICIENS,

Qui ont guidé nos premiers pas dans la profession.

A MES PARENTS,

Un bien modeste témoignage de ma reconnaissance.

A MES FRERES ET SOEUR,

A MA FAMILLE.

LES ALGUES SPIRULINES

-oOo-

(Spirulina platensi et Spirulina maxima)

BIOLOGIE PROPRIETES

UTILISATIONS TRADITIONNELLES

PROCEDES DE CULTURE

TRAITEMENTS INDUSTRIELS ET PRODUITS DERIVES

LES ALGUES SPIRULINES

-oOo-

INTRODUCTION ..... p 1

CONSTITUTION DES SPIRULINES ..... p 7

A - STRUCTURE .... p 7

I - STRUCTURE CELLULAIRE ..... p 7

1 - La paroi ..... p 7
2 - Les Inclusions ..... p 7
3 - Composition ..... p 9
4 - Membranes chlorophylliennes et systèmes pigmentaires ..... p 9

a - Structure ..... p 9
b - Spectres d'absorption ..... p 11

II - PHOTOSYNTHESE ..... p 12

1 - Réactions ..... p 12
2 - Energie nécessaire - Vitesse de croissance ..... p 12

B - CONSTITUANTS CARACTERISTIQUES DES SPIRULINES ..... p 12

I - PROTEINES BRUTES ..... p 13

II - ACIDES NUCLEIQUES ..... p 15

III - LIPIDES ..... p 15

1 - Les acides gras ..... p 15
2 - L'insaponifiable ..... p 15

a - Les stérols ..... p 15
b - Les alcools triterpéniques ..... p 17
c - Les hydrocarbures ..... p 17

IV - LES GLUCIDES ..... p 17

1 - Glucides extractibles sans hydrolyse .. p 18

a - Glucides métabolisables ..... p 18
b - Glucanne ..... p 18
c - Rhamnosanne ..... p 18
d - Cyclitols ..... p 19

2 - Glucides des parois ..... p 19

a - Acide sialique ..... p 19
b - Glucanne et rhamnosanne ..... p 19
c - Acide muramique et glucosamine ..... p 19
d - Glycogène ..... p 19

3 - Conclusion ..... p 20

UTILISATION TRADITIONNELLE DES ALGUES SPIRULINES ..... p 21

A - MILIEUX A OSCILLATORIA PLATENSIS ..... p 21

B - RECOLTE DES O. PLATENSIS .....p 25

C - ALIMENTATION TRADITIONNELLE ..... p 26

D - CONSOMMATION DES SAUCES AUX SPIRULINES ("dié") ..... p 26

E - VALEUR ALIMENTAIRE DU DIE ..... p 29

PROCEDES DE CULTURE DES ALGUES SPIRULINES ..... p 31

A - MILIEU DE CULTURE ..... p 32

B - LES BASSINS DE CULTURE .....p 33

C - CONCENTRATION ET FILTRATION DES SPIRULINES ..... p 36

D - SECHAGE DES SPIRULINES ..... p 37

E - PRODUCTION DES SPIRULINES ..... p 37

F - MICROFLORE DES DIFFERENTES PREPARATIONS EN SPIRULINES p 37

A) Examen microbiologique ..... p 37
B) Activité antibiotique ..... p 41

TRAITEMENT INDUSTRIEL DES ALGUES SPIRULINES ..... p 43

A - DECOLORATION DES SPIRULINES HUMIDES .....p 43

B - DECOLORATION DES SPIRULINES SECHES ..... p 44

C - CARACTERISTIQUES DES SPIRULINES DECOLOREES ..... p 44

1) Propriétés organoleptiques ..... p 44
2) Composition chimique ..... p 45
3) Problèmes posés par les solvants résiduels ..... p 45

D - RECHERCHE ET DOSAGE DE DIVERS TOXIQUES DANS LES ALGUES SPIRULINES ..... p 46

I) Nature et devenir de l'heptadécane .....p 46

1) Méthodes .....p 46

2) Résultats et discussion ..... p 46

a - Nature des hydrocarbures ..... p 46
b - Accumulation de l'heptadécane chez le rat ..... p 47
c - Accumulation de l'heptadécane chez le porc ..... p 48
d - Conclusion ..... p 49

II) Recherche du 3,4-benzopyrène ..... p 49

III) Recherche de différents toxiques minéraux .... p 50

E - CONCLUSION ..... p 57

ESSAIS D'INCORPORATION DE SPIRULINES (Sp.maxima) DANS L'ALIMENTATION ..... p 59

A - DANS L'ALIMENTATION DES PORCS ..... p 59

I) Composition des algues utilisées ..... p 59
II) Alimentation du porcelet ..... p 61

1 - Caractéristiques des régimes utilisés ... p 61
2 - Résultats zootechniques ..... p 64
3 - Résultats concernant la digestibilité ... p 65

III) Alimentation de la truie reproductrice ..... p 68

1 - Caractéristiques des régimes utilisés ... p 68
2 - Résultats et discussion ..... p 70

a - Période prépubertaire ..... p 70
b - Premier cycle de reproduction ... p 70
c - Deuxième cycle de reproduction .. p 73
d - Discussion ..... p 73

B - DANS LES ALIMENTS DES POULES PONDEUSES ..... p 76

I) Caractéristiques des régimes utilisés ..... p 76
II) Résultats et discussion ..... p 77

C - DANS L'ALIMENTATION DU POULET DE CHAIR ..... p 80

I) Utilisation des spirulines comme source de protéines dans les régimes complets ..... p 81

1 - Matériel et méthodes ..... p 84
2 - Résultats et discussions ..... p 85

II) Qualité des protéines et valeurs énergétiques des algues spirulines ..... p 87

1 - Matériel et méthodes ..... p 87
2 - Résultats ..... p 89
3 - Conclusion ..... p 92

III) Essais de valorisation des algues par addition d'amyloglucidase ..... p 92

IV) Conclusion ..... p 94

D - DANS L'ALIMENTATION HUMAINE ..... p 95

I) Acceptabilité ..... p 95

II) Valeur nutritionnelle ..... p 97

III) Conclusion ..... p 100

CONCLUSION ..... p 101

BIBLIOGRAPHIE ..... p 103

-oOo-

Durant ces dernières années, il s'est produit des modifications des sources d'approvisionnement en protéines s'accompagnant d'importantes variations des cours. De plus, l'augmentation des productions animales implique l'emploi de davantage de concentrés. Les principales sources de protéines, farines animales et tourteaux (soja, arachide, lin, colza, coton), sont produites par un nombre restreint de pays : le Pérou produit plus de la moitié de la farine de poisson, les U.S.A. sont les principaux producteurs de soja.

De ce fait, les moyens de diminuer la consommation des protéines conventionnelles ainsi que les modes de production des produits de substitution ont connu un rapide développement. La diversification des apports réduit les risques de pénuries et de dépendances économiques.

D'autre part, le déficit chronique de l'humanité en nourriture ne fait que se creuser de par l'explosion démographique des pays en voie de développement et l'incapacité des moyens de production conventionnels à couvrir leurs besoins et à suivre l'évolution de la demande.

C'est pourquoi l'intérêt se porte :

- sur des productions agricoles :

  connues - à promouvoir (féverolle, fève,...)
  - à développer (pois, luzerne, ...)

  nouvelles - soja dans la C.E.E.
  - maïs riche en lysine.

  non conventionnelles - résidus et sous-produits des industries de la banane, café, citron, pomme, whisky.

- sur l'utilisation des déchets industriels et agricoles.

- sur des produits de substitution industriels :

  - azote industriel : azote non protéique
  - acides aminés de synthèse : D.L. méthionine, L. lysine
  - protéines industrielles : micro organismes (20).

Champignons	Substrat	Remarques
Fusarium sp.	Glucides Amidon	Utilisé par la société RANK HAVIS MC DOUGALL
Boletus edulis Marchella esculenta	Diverses sources organiques	Culture de champignons macrobiologique (champignon de couche)

Levures	Substrat	Remarques
Saccharomyces cerevisiae	Mélasses	Substrat sous produit de l'industrie sucrière facilement disponible
S. cerivisiae	Céréales	La levure est un sous produit de l'industrie et de la brasserie
Candida utilis	Liqueurs sulfitiques du bois hydrolysé et du papier, ordures ménagères et bagasse de canne	Cet organisme peut utiliser des sucres à 5 et 6 carbones présents dans les produits du bois
Saccharomyces fragilis	Lactosérum	Utilisation spécifique du lactose de ce sous produit
Candida lipolytica et analogues	N-Paraffine	Ancien procédé de raffinement devenu un procédé commercial utilisé pour la production de protéines.

Bactéries	Substrat	Remarques
E. coli et autres espèces	Hydrolisats de glucides et nombreux autres composés organiques simples	Intérêt seulement théorique
Oxydant du méthane	Méthane provenant des égouts et du gaz naturel	Etudié extensivement mais problème de par le rendement trop faible
Oxydant du méthanol	Méthanol produit chimiquement à partir du méthane	Autre procédé de conversion du méthane en protéines
Oxydant de l'hydrogène	Hydrogène obtenu par électrolyse	Utilisable pour les voyages spatiaux
Producteurs de méthane	Glucides hydrolysés etc...	Procédé strictement anaérobie se produit naturellement dans les rumens des vaches et dans les réservoirs de traitement anaérobie des eaux d'épuration
Pseudomonas	Cyanures	Transformation des déchets provenant des traitements des métaux ou des usines de galvanoplastie.

Algues	Substrat	Remarques
Diverses	Produits d'oxydation des eaux d'égouts et lumière solaire	Croissance avec des bactéries pour le traitement des déchets dans des bassins plats oxydants
Chlorella sp. Scenedesmus sp. Spirulina maxima	N'importe quelle source bon marché de CO_2 et lumière solaire	Organismes photosynthétiques qui croissent aisément si lumière et CO_2

De nombreuses sociétés se sont penchées sur ces différents types de production :

Substrat	Micro-organismes	Sociétés
N-Paraffine	Bactéries ou levures	Liquichimica Kanegafuchi B.P. Gulf Research and Developpement
Gazole	" " "	B.P. Gouvernement Rase
Méthanol	" " "	Imperial Chemical Industrie
Ethanol	" " "	Exxon Amoco Food Company
Méthane	Bactéries	Research Ltd. Shell
Hydrocarbonates	Champignons	Rank Hovis Mc Dougal
Sucres	Bactéries et levures	Tate et Lyde
Cellulose	Bactéries, levures, champignons	General Electric and C° Finish Pulp and Paper association
CO_2	Algues	Institut Français du Pétrole

Critères imposés pour ces différentes productions :

- taux de croissance extrêmement élevé (temps de génération de l'ordre d'une heure).

Ainsi par ha et par an, il est obtenu en protéines :

24.300 kg avec Spirulina platensis (algue)
15.700 kg avec Chlorella pyrenoïdes

alors qu'avec les cultures fourragères on obtient :

1 680 kg avec feuilles de trèfle
395 kg avec pois.

- milieu de culture en suspension
- contamination non gênante
- fermentation stable
- tolérance envers les produits toxiques du milieu
- tolérance envers les traitements mécaniques

- extraction facile des protéines
- bonne digestibilité
- stabilité du produit
- pas de mycotoxines ou autres produits toxiques
- pas de résidus aromatiques cancérigènes.

L'intérêt des cultures de microorganismes se traduit par l'absence d'influence des aléas biologiques, la possibilité d'obtenir des mutants économiquement plus rentables, la présence de tous les acides aminés essentiels et de vitamines du groupe B.

Cultures d'algues.

Elles fournissent :

- de très bonnes sources de protéines (jusqu'à 65 % de la matière sèche),
- des protéines de très bonne qualité : composition en g. d'acide aminé pour 100 g de protéines

	Lait	Tourteaux de soja	Tourteaux d'arachide	Spiruline
Lysine	7,6	6,3	3,5	4,6
Méthionine	2,4	1,4	0,9	1,4
Méthionine + Cystine	3,3	3,2	2,4	1,8

Leur vitesse de croissance est élevée (140 Kgs de matière sèche par ha et par jour en culture de plein air).

Elles utilisent, par la fonction chlorophyllienne, le carbone du gaz carbonique.

Leur vie en milieu aqueux permet une alimentation aisée.

Le contrôle de la croissance est facile avec ces cultures artificielles en milieu synthétique.

Mais, elles nécessitent un ensoleillement important.

La culture de l'algue verte d'eau douce Scenedesmus obligus a déjà fait l'objet d'études et les protéines dont elle est la source ont été incorporées dans l'alimentation porcine.

L'exploitation en bassin d'aération ouvert a fourni un produit contenant :

Protéines	52 %	Azote libre	15,5 %
Lipides	4,75 %	Minéraux	12,9 %
Cellulose	9 %	Eau	7,6 %

L'exploitation de Chlorella reste encore limitée par un faible taux en Méthionine.

Mais l'emploi de la Spiruline (Cyanophycée multicellulaire de 250 microns) envisageable dans des bassins en eau peu profonde fournit un produit contenant :

Protéines	60 - 65 %	de la matière sèche
Glucides	18 - 20 %	" "
Lipides	2 - 3 %	" "

L'avantage des protéines issues de cultures d'algues réside dans leur croissance aisée à partir de n'importe quelle source bon marché de lumière et de gaz carbonique.

Parmi les procédés de culture d'algues, celui des Spirulines en milieu semi-naturel et artificiel (procédé Institut Français du Pétrole) semble être le plus intéressant.

C'est pourquoi, nous nous proposons, après un aperçu sur leur constitution, leurs propriétés et leurs utilisations traditionnelles, d'envisager les différents procédés de culture et traitements industriels ainsi que les produits dérivés qui en découlent.

CONSTITUTION DES SPIRULINES

-oOo-

A - STRUCTURE.-

Les Spirulines sont des Cyanoschizophytes, protocaryotes proches des bactéries par les particularités de leur génophore. Celui-ci est formé de fibrilles apparemment nues d'A.R.N., non liées à des histones ; ce rapprochement est accentué par l'absence dans les cellules de membranes nucléaires, de mitochondries et de plastes.

Par ailleurs, ces organismes possèdent des membranes chlorophylliennes, si la possession de pigments accessoires bleus et rouges les rapprochent des algues rouges, la dominante bleu-vert de leur couleur leur vaut l'appellation "d'algues bleues".

Les Spirulines étant formées d'un filament spiralé formé de plusieurs cellules issues de la division de l'une d'entre elles, ce sont des Oscillatoriacées.

Spirulina platensi est formée d'un filament de 10 microns de diamètre tirebouchonné en 6 à 7 spires non ramifiées d'une longueur totale de 200 à 300 microns. Le nombre de cellules par filament, la longueur et le tassement des fibres sont essentiellement fonction du milieu de vie.

I - STRUCTURE CELLULAIRE (Spirulina platensis)(19).

1 - La paroi.

Formée d'au moins quatre couches de mucopolymères, elle a 40 nm d'épaisseur et possède ça et là des perforations. Sa sensibilité aux lysozymes et à la streptomycine provoque sa dégradation.

La plasmalemme ou membrane périphérique d'environ 10 nm d'épaisseur est formée comme toutes les membranes de deux couches de lipides dans lesquelles sont embouties des protéines. Du fait des différences importantes de concentration entre les milieux intra et extra cellulaires, elle joue probablement un rôle de filtre sélectif dans la perméabilité cellulaire ; en outre, elle pourrait posséder des enzymes respiratoires à sa surface et participer à la synthèse des membranes chlorophylliennes.

2 - Les Inclusions.

Généralement phériphériques, il s'agit de polyphosphates,

de gouttelettes lipidiques, de glycogène et de corpuscules protidiques (cyanophicine) probablement de réserves.

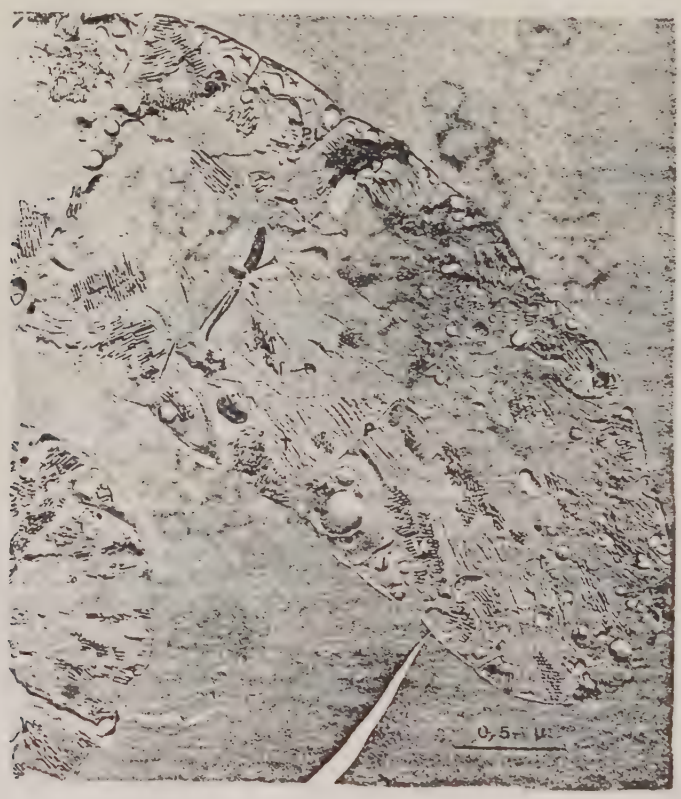


FIG. 1

Fragment de filament de Spirulina platensis.

Réplique obtenue par cryodécapage et photographie en microscopie électronique.

I : inclusion de nature indéterminée
P : paroi cellulaire
PL : plasmalemme
T : membranes chlorophylliennes des thylakoïdes
V : vacuoles à gaz.

Photo I.F.P.

Les vacuoles à gaz, nombreuses, situées à la périphérie de la cellule, lui donnent une densité inférieure à celle du milieu ambiant, expliquant la situation en fleur d'eau des algues.

3 - Composition (% matière sèche)(21).

Protéines	:	64 à 70 %
Lipides	:	5 à 7 %
Glucides	:	12 à 17 %
Minéraux	:	5 à 8 %

4 - Membranes chlorophylliennes et système pigmentaire.

a - Structure.

Les membranes forment le chromatoplaste, ensemble de sacs aplatis assez comparables aux sacs lamellaires des algues vertes et des végétaux supérieurs ; formés par des replis d'une membrane lipoprotéique de 8 à 10 nm d'épaisseur, membrane formée de deux couches superposées :

- l'une a des particules de 8 nm de section (surface Y)
- l'autre des particules de 15 nm de section (surface X).

Les grosses particules sont souvent alignées régulièrement (alignements distants de 60 à 80 nm).

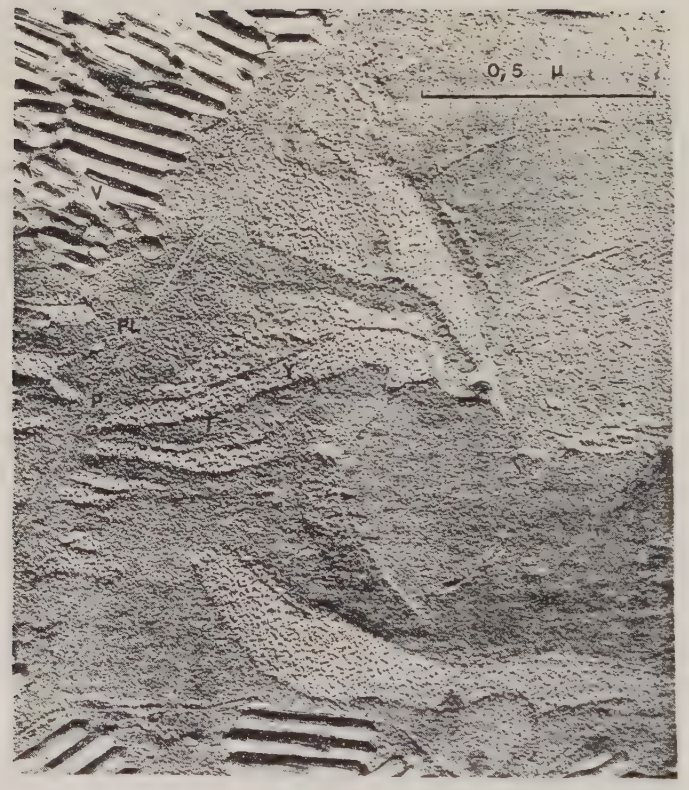


FIG. 2.

Réplique de cellule de Spirulina platensis, obtenue après cryo-décapage et photographie en microscopie électronique.

P : paroi
PL : plasmalemme
T : membrane chlorophyllienne d'un thylakoïde
V : vacuoles à gaz
X : surface à grosses particules présentant parfois des alignements
Y : surface à petites particules.

b - Spectres d'absorption (19).

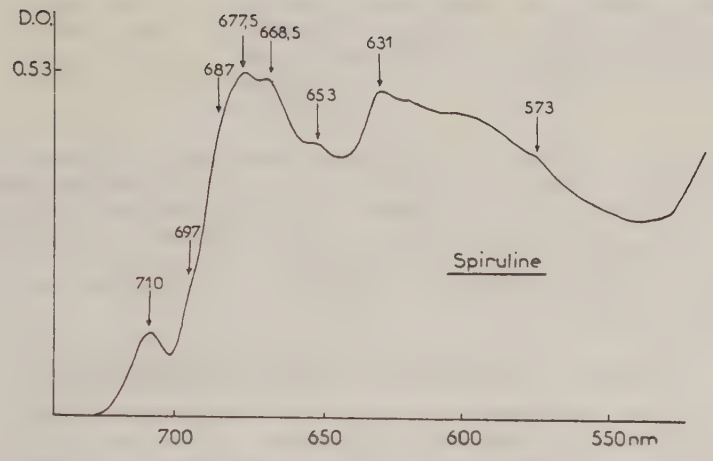


FIG. 3.

Spectre d'absorption d'une suspension de Spirulina platensis, obtenu à - 196°C, entre 530 et 720 nm.

Spectre : Guérin Dumartrait - Université Paris Sud ORSAY.

Les pics 710, 697, 687, 677,5 et 668,5 nm correspondent à différents complexes chlorophylliens ou holochromes.

De plus, différentes biliprotéines existent :

- à 653 nm la bosse correspond à l'allophycocyanine
- à 631 nm le pic correspond à la phycocyanine très abondante (responsable de la couleur bleu-vert des Spirulines)
- à 573 nm un épaulement révèle la présence de phycoerythrine.

Toutes ces biliprotéines constituent des granules de 35 nm de section, les phycobilisomes disposés contre les membranes à l'extérieur en rangées régulières distantes de 60 à 80 nm disposition retrouvée chez les cyanoschyzophytes et les algues rouges.

Les caroténoïdes ainsi que les p 700, plastoquinones, cytochromes, plastocyanines furedoxine sont présents dans ces membranes.

II - PHOTOSYNTHESE.

1 - Réactions.

Les phycocyanines, la phocoerythrine et une part importante des différents complexes chlorophylliens forment les antennes collectives des photons, utilisés après conversion en énergie chimique dans les réactions d'oxydo-réduction photosynthétiques.

Tout d'abord interviennent les centres actifs (type P 700) et les transporteurs cités ci-dessus, puis le CO_2 fixé par voie enzymatique dans les régions extramembranaires des cellules est réduit. Enfin, certaines des membranes internes peuvent posséder des transporteurs d'électrons de la chaîne d'oxydo-réduction respiratoire et être responsables des oxydations terminales de la respiration cellulaire.

2 - Energie nécessaire - Vitesse de croissance.

L'énergie quantique, mesurée pour un éclairement voisin de la saturation lumineuse est de 23 photons de lumière blanche pour une molécule de CO_2 assimilée, soit un rendement énergétique de l'ordre de 10 %

La vitesse de photosynthèse est de 15 µmoles de CO_2 assimilé h^{-1} mg^{-1} d'algues sèches soit 340 ml CO_2 h^{-1} g^{-1} d'algues sèches.

La production théorique est, en alternance jour nuit de 12 h., de 42 g de matière sèche par m^2 et par jour ; sur le terrain et avec des conditions externes favorables elle est de 12 g/m^2/jour, rendement élevé si l'on tient compte de la valeur énergétique élevée des composants synthétisés à dominance protéique.

B - CONSTITUANTS CARACTERISTIQUES DES SPIRULINES (9).-

Spirulina platensi et Spirulina maxima ont une teneur élevée en protéine (64 à 72 % M.S.) une teneur faible en lipides et fibres brutes.

Composition chimique de deux échantillons de Spirulines, (T.N.O., Zeist, Hollande, rapport 3193, 1970)(34).

Analyse	p. 100 (1)	p. 100 (2)
Eau	3,6	4,2
Protéine brute (N p 100 x 6,25)	72,6	64,2
Lipides totaux	7,3	5,0
Glucides totaux (méthode de Sachsee)	12,4	16,9
Cendres (550°C)	4,7	6,6
Fibre brute (cellulose)	0,6	0,5
TOTAL	101,2	97,4
Glucides digestibles (dextrose)	10,2	13,8
Glucides solubles (dextrose)	0,4	2,7
Cendres insolubles dans HCL	0,05	0,18
Ca (mg/100 g)	98	65
P (mg/100 g)	870	890
Fe (mg/100 g)	53	59
Na (mg/100 g)	290	1.100
Cl (mg/100 g)	20	440

(1) Spirulina platensis cultivées en milieu synthétique à l'I.F.P., lavées, lyophilisées.

(2) Spirulina maxima, bassin semi-naturel de Sosa Texcoco de 100 ha, lavées, atomisées.

I - PROTEINES BRUTES.

Protéine brute - Acides aminés de Spirulina maxima et platensis.

(1) Spirulina maxima cultivées à l'I.F.P. en milieu synthétique, lavées, lyophilisées.

(2) Spirulina platensis cultivées à l'I.F.P. (culture synthétique continue dans les bassins de 5 m^2) lavées, lyophilisées.

(3) Spirulina platensis. Expérience (2) après deux ans de culture continue.

(4) Spirulina maxima. Bassin semi-naturel de 100 ha de Sosa Texcoco, lavées, séchées par atomisation.

(5) Spirulina maxima. Expérience (4) mais séchées sur rouleaux.

(6) L'échantillon (4) a été décoloré par un mélange éthanol + acétone à la température du reflux.

Acides aminés exprimés en g pour 100 g de protéine (T.N.O., Zeist, Hollande, rapport 3193, 1970).

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Isoleucine	6,0	6,24	6,5	6,02	5,65	6,6
Leucine	9,3	8,91	9,2	8,65	8,1	10,1
Lysine	4,7	4,58	5,0	4,53	4,25	5,0
Méthionine	2,7	2,65	2,6	2,45	2,1	2,8
Cystine	0,89	0,94	0,94	0,96	1,13	0,76
Phénylalanine	4,3	4,53	4,6	4,40	4,2	5,1
Tyrosine	5,0	4,84	4,9	4,54	4,15	5,1
Thréonine	5,1	5,23	5,8	5,14	4,6	5,4
Tryptophane	1,3	1,60	1,6	1,61		1,58
Valine	6,8	6,74	7,0	8,56	5,1	7,5
Arginine	6,7	6,41	6,9	6,45	6,15	7,3
Histidine	1,4	1,51	1,7	1,58	1,5	1,7
Alanine	7,8	7,90	8,0	7,54	6,6	7,9
Acide Aspartique	9,7	8,92	9,5	9,29	9,6	10,6
Acide glutamique	12,9	12,55	13,1	13,28	15,6	13,4
Glycine	5,2	4,87	5,1	4,92	4,75	5,8
Proline	4,0	3,48	4,3	3,63	3,8	3,8
Sérine	5,6	5,48	5,7	5,29	4,5	6,0
N p.100 Kjeldahl	11,03	11,59	11,26	10,29	8,69	13,47
Protéine (N p 100 x 625)	68,9	72,4	70,4	64,3	51,9	84,2

Si la teneur en protéines la plus élevée est obtenue avec des Spirulines cultivées en milieu synthétique contrôlé par l'Institut Français du Pétrole, des variations en teneur peuvent être observées, notamment diminution importantedes protéines quand le milieu présente une carence en nitrates.

Le mode de séchage a également une influence sur la composition du produit final, le séchage sur rouleaux est plus difficile à réaliser que l'atomisation ; mais par contre un lavage efficace des Spirulines les débarrasse des sels du milieu nutritif et permet d'améliorer leur teneur en protéines. Après décoloration, cette teneur est encore très élevée (85 % en protéines) et l'on obtient une poudre faiblement colorée (colonne 6).

II - ACIDES NUCLEIQUES.

Les Spirulines contiennent environ 4 % d'acides nucléiques, quantité faible par rapport aux autres cultures de micro-organismes (levures et bactéries).

III - LIPIDES (36)(25)(9).

Extraites par un mélange de solvants, les teneurs sont fonction des techniques employées pour ces analyses ; isolées par un mélange de chloroforme et de méthanol les "lipides vrais" sont présents à raison de 6 à 7 % M.S. Les acides gras et l'insaponifiable entrant respectivement pour 83,1 et 16,9 %.

1 - Les acides gras.

Les analyses donnent les mêmes résultats avec les souches Spirulina platensis et maxima. Il n'y a que des acides gras à nombre pair d'atomes de carbone.

Il s'agit essentiellement de l'acide gras saturé en C_{16} (acide palmitique) et d'acides mono, di et tri insaturés en C_{18} caractéristiques de ces deux espèces de Spirulines.

Les acides gras insaturés en C_{18} sont l'acide linoléique et l'acide γ linoléique (cis 6 cis 12 octadécatriénoïque) ; la teneur de chacun d'eux est supérieure à 20 % des acides gras totaux (chez les végétaux c'est l'acide linoléique qui domine, formant 60 à 70 % des acides gras totaux).

2 - L'insaponifiable.

Il est formé notamment par des stérols et des alcools triterpéniques.

Le scalène, produit intermédiaire dans la synthèse de ces substances, a été mis en évidence dans les deux souches platensi et maxima.

a - Les stérols représentent 1 à 5 % de l'insaponifiable ; il s'agit essentiellement du cholestérol, se trouve également en plus faible quantité, le sisostérol. Spirulina platensis contient de faibles quantités de campestérol

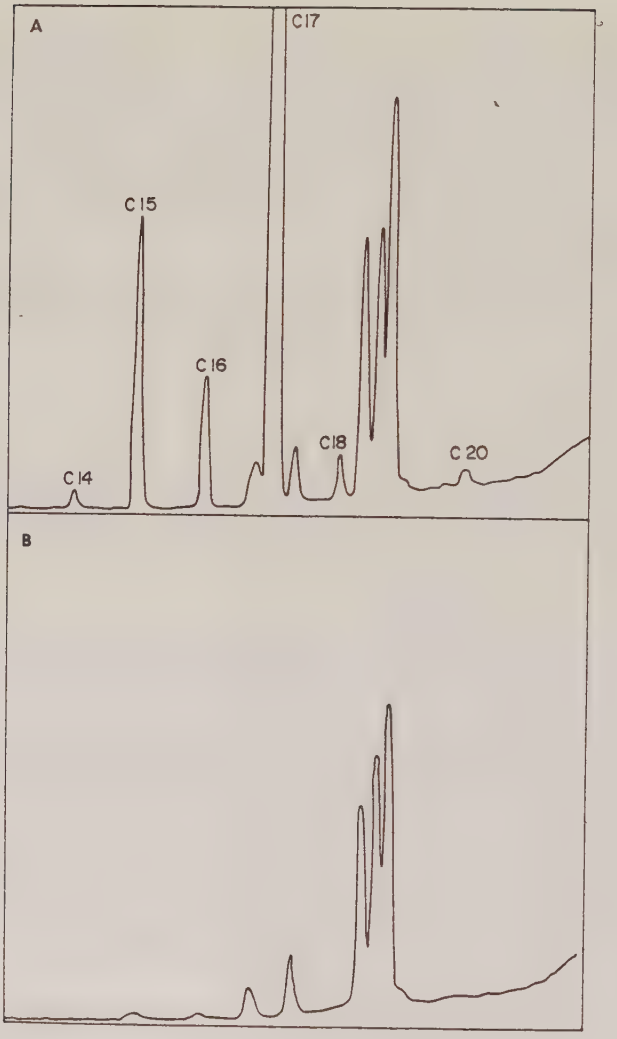


FIG. 1.
Analyse des hydrocarbures par chromatographie en phase gazeuse par TULLIEZ et CO - INRA - Laboratoires de Recherche sur les additifs alimentaires, Toulouse.

A : extrait total
B : extrait passé sur tamis moléculaire.

et de stigmastérol ; Spirulina maxima seulement des traces de stigmastérol

Par ailleurs, la présence de ces stérols serait en relation avec une activité anti-microbienne des Spirulines (11) (27).

b - Les alcools triterpéniques représentent de 5 à 10 % de l'insaponifiable.

L'α-amyrine, alcool triterpénique pentacyclique se trouve dans les deux souches ; dans la souche platensi, c'est le composé le plus important où il se trouve avec son isomère β .

c - Les hydrocarbures (35) constituent près de la moitié de la fraction de l'insaponifiable des algues Spirulines soit 0,1 à 0,3 % en poids ; le n-heptadecane en est le constituant majeur (65 %).

Dans ce point de vue, on trouve une certaine analogie avec des sources nouvelles de protéines comme les levures cultivées sur alcanes qui peuvent contenir de 0,008 à 0,05 % d'hydrocarbures résiduels suivant le procédé de fabrication.

Le tableau montre les résultats d'analyses de ces substances par chromatographie en phase gazeuse associée au passage sur tamis moléculaire qui retient les n-alcanes. En dehors de l'heptadécane, il existe des séries homologues paires et impaires des n-paraffines de 14 à 20 atomes de carbone. La fraction non retenue sur tamis moléculaire correspond à des hydrocarbures ramifiés.

IV - LES GLUCIDES (30).

La matière glucidique forme 15 %/M.S. pour la masse soluble, glucosanne azoté 1,9 %, rhamnosanne azoté 9,7 %, glycogène 5 %, meso-inositol 2 à 3 %.

Les parois s'apparentent étroitement à celles des bactéries Gram +, elles sont en effet formées de glucosamine et d'acide muramique associés à des peptides.

Peu digestes mais non toxiques, leur valeur alimentaire est faible.

Si la phytine est un apport intéressant de phosphore, c'est également un décalcifiant qui serait à compenser par un apport supplémentaire de calcium.

Des méthodes d'extraction progressive permettent de mettre en évidence une grande variété de glucides.

En partant d'un matériel à base de Spirulina platensi délipidé par acétone alcool absolu, on trouve deux groupes distincts :

1. Les glucides extractibles, sans hydrolyse notable, par l'alcool ou l'eau qui forment la réserve métabolique de l'algue.
2. Les glucides extraits par hydrolyse acide ou alcaline et qui entrent dans la composition des parois.

1 - Glucides extractibles sans hydrolyse.

a - Glucides métabolisables.

- Glucides et polyols à petites molécules.

. Dans les premiers extraits : alcool absolu, alcool à 85° bouillant se trouvent : glucose, fructose, saccharose, etc..., du glycérol et divers polyalcools (mannitol et sorbitol) se trouvent en infime proportion et présentent donc peu d'intérêt alimentaire.

b - Glucanne.

. A partir de l'alcool à 70°, les extraits sont plus abondants ; par évaporation, il est obtenu un polysaccharide qui cristallise sous forme de micro-cristaux présentant le phénomène de croix noire entre deux nicols croisés ; c'est un glucosanne, fortement dextrogyre, dont l'analyse automatique donne après hydrolyse :

Glucose	84
Galactose	traces
Rhamnose	0
Arabinose	1
Xylose	4
Glucosamine	11
	100

Il s'agirait d'un glucanne lié en 1-3 contenant une certaine proportion de glucosamine.

c - Rhamnosanne.

. Dans l'alcool à 0° ou dans l'eau bouillante, est obtenu ensuite un polyose aminé dont la poudre blanche peu hygroscopique est obtenue par floculation dans l'alcool fort, son hydrolyse acide puis son analyse automatique, donne la composition molaire suivante :

Rhamnose	61
Glucose	10
Galactose	0
Arabinose	2
Xylose	3
Glucosamine	24
	100

. Ensemble, glucosanne et rhamnosanne forment 11 à 12 % du poids sec de l'algue brute soit respectivement 9 % et 9,7 %. Notons l'absence de galactose et de ses dérivés.

d - Cyclitols.

. Après utilisation d'acide étendu et froid (HCl 0,5 N) vient un mésoinositol plus ou moins phosphaté ainsi que des cyclitols faiblement actifs sur la lumière polarisée. Une petite quantité de cyclitol méthylé, le laminitol donne des cristaux très peu solubles dans l'eau, reconnaissables par leurs troncatures caractéristiques.

Leur proportion est en première approximation estimée à 3 % des Spirulines brutes. Notons l'importance métabolique des cyclitols phosphatés qui, s'ils sont des donneurs de phosphore très importants, sont également des inactiveurs de calcium.

2 - Glucides des parois.

- Acide sialique.

Son existence est peu sûre de par les quantités importantes de substances étrangères qui accompagnent la fraction où il devrait être, les réactions normalement caractéristiques sont capricieuses.

- Glucanne et rhamnosanne.

L'extraction à froid ne fait que ressortir les composants cités plus haut et soupçonner les composés glucosaminés des parois.

- Acide muramique et glucosamine.

Les hydrolysats débarrassés de leur acide chlorhydrique par l'évaporation sous vide en présence de soude, cheminent sous l'action de champs électriques pH 2,8 et à pH 4,5.

- Glycogène.

Il peut être estimé à 0,5 % du poids du matériel brut.

Toutes ces observations amènent à envisager une paroi de type bactérien ; rappelons que, par ailleurs, la morphologie des algues bleues protocaryotes est elle-même assez proche de certaines bactéries.

Il est même possible de préciser que la paroi des Spirulines est proche des Gram +, du groupe de celles qui élaborent des mucilages à rhamnose.

L'absence de glucolipides, la présence d'un abondant polysaccharide rhamnosique, la présence de glucosamine, de glucosamine et d'acide muramique associés à des peptides où l'on trouve sérine, alanine, acide glutamique, la présence d'acide sialique sont autant d'éléments en faveur de cette hypothèse, d'autant plus que les Spirulines prennent le gram; moins nettement cependant que les bactéries Gram plus typiques.

3 - Conclusion.

Les Spirulines ont une paroi proche de celle des bactéries Gram + ; elles contiennent à côté de sucres simples et de saccharose de petites doses de glycogène.

Elles renferment un peu de glycérol et de polyalcools, un mucilage formé d'un glucosanne et surtout d'un rahmnosanne, tous deux aminés (10 à 12 % poids de l'algue brute).

Elles accumulent 2 à 3 % de cyclitols (méso inositol) sous forme phosphorylée.

Le squelette (environ 2 % M.S.) est fait de glucosamine et d'acide muramique associés à des chaînes peptidiques.

A priori peu digestes, ses parois ne constituent qu'un lest sans danger. Mais si l'équipement glucidique des algues Spirulines n'est pas considérable, il faut noter la richesse en phosphore, organique, lié en grande partie à des cyclitols.

Le pouvoir décalcifiant desdits cyclitols n'est pas à négliger, il doit être compensé par un apport supplémentaire en calcium dont la quantité est faible (98 ppm de Ca et 870 ppm de P.).

UTILISATIONS TRADITIONNELLES DES ALGUES SPIRULINES

-oOo-

Au Mexique (10)(11)(14), les Spirulines (Spiruline
ima) étaient consommées par les populations Aztèques vivant
our du lac Texoco avant la conquête espagnole ; le ravitail-
ent de la grande cité de Tenochtitlan où vivaient 150.000
00.000 personnes était parfois précaire. Aussi la récolte
ne boue flottant à la surface des eaux saumâtres et non
ables du lac que l'on appelait à l'époque "excréments de
rre"permettait de sécher ces algues au soleil, de les cuire
de les consommer sous le nom de "Tecuiltalt".

Actuellement, seules des populations tchadiennes con-
ment des Spirulines (Spirulina platensis) de manière sponta-
; il s'agit de populations du Kanem situées dans la zone
récolte (à l'est du lac Tchad et à cheval sur le 14ème
allèle) et à sa périphérie.

MILIEUX A OSCILLATORIA PLATENSIS (13).-

La zone de consommation des Spirulines, vendues sous
me de plaques d'algues séchées ("dié") est située à l'inté-
ur du Kanem géographique, pays à cheval sur le 14ème parallèle
limité par le Barhr-el-Ghazal à l'est et le lac Tchad à
uest (cf. carte) ; elle s'étend sur une petite partie des
fectures du lac et du Kanem.

Le climat est de type sahélien, la culture principale
le mil pénicillaire, mais la présence d'une nappe d'eau
profonde donne au sud du pays une certaine diversité de
sources et permet un élevage important. Ceci explique que
une population atteignant environ 300.000 habitants pour
préfectures du lac et du Kanem, une partie seulement est
chée par la consommation des algues.

Les Kanembou constituent l'ethnie numériquement dominante,
vie par les pêcheurs Boudouma et les Kouris au bord du lac
ad ; plus au nord, les populations nomades, Uaza Gorane,
bous, et arabes dominent. L'islamisation et la sédentarisa-
n de la plupart de ces groupes et leur cohabitation leur ont
t adopter des habitudes de vie voisines, particulièrement en
qui concerne leur alimentation.

Trois catégories de mares à Spirulines sont schémati-
ment considérées :

- en bordure du lac Tchad dans la région d'Ameron,
  les fonds de bras du lac séparés de celui-ci par

AFRIQUE

Carte de situation du Tchad.

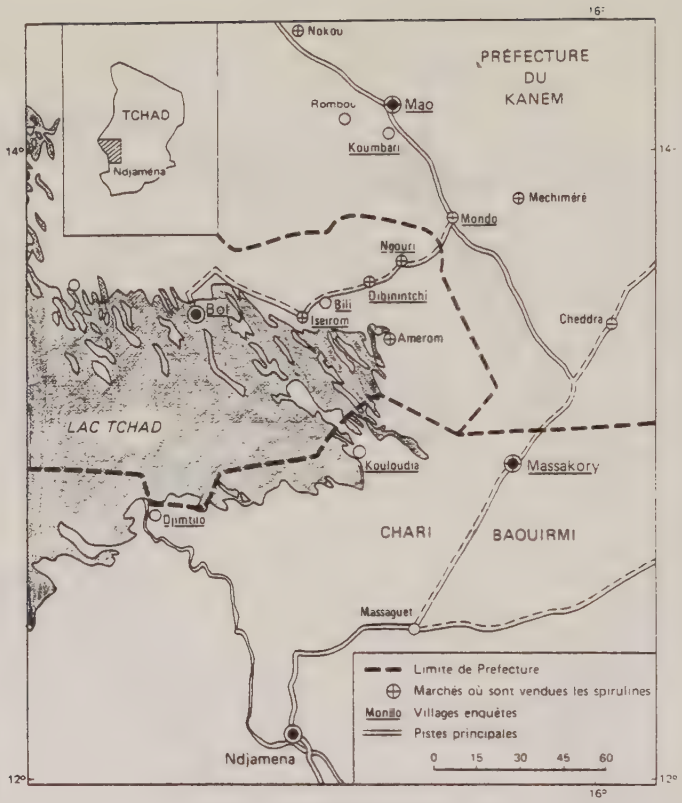


Fig. 1. — Carte de situation du Kanem.

des mouvements dunaires, constituent les principaux lieux de récoltes des Spirulines (Kambara, Souya, Kore-Kore, Kada).

- plus à l'intérieur des terres, dans des dépressions appelées "ouaddis" formées par un système dunaire et pouvant atteindre 30 à 40 ha, sont installées des mares temporaires, souvent asséchées à la saison chaude et qui peuvent être colonisées par des algues spirulines.

- quelques lacs permanents, Rombou (15 ha) et Boudou (75 ha) sont sujets à des opérations de récolte.

Du point de vue physico-chimique :

Les mares à Spirulines sont assez natronées avec une teneur élevée en carbonates et bicarbonates.

Limites de salinité pour O. platensis :

- de 8,5 à 270 g de sels par litre
- pH de 9,5 à 11,0.

Température moyenne de l'eau : 28,3°C.

La biomasse de Spirulines en pleine eau peut varier entre 0,01 mg/l et 1,0 mg/l.

Dans ces milieux les Spirulines sont mêlées à de nombreuses algues, des rotifères, des débris végétaux, des nématodes et des insectes aquatiques.

B - RECOLTE DES O. PLATENSIS.-

Les Spirulines de pleines eaux sont poussées par le vent et s'accumulent sur le bord en grande quantité ; prélevées dans un récipient métallique, elles sont : soit transvasées, à travers un panier tressé, dans une poterie, soit versées directement.

A mi-pente de la dune la plus proche, le contenu des poteries est déversé à même le sable dans des cuvettes circulaires peu profondes.

Là s'effectue la concentration, le sable absorbant la plus grande partie des sels et de l'eau ; la galette ainsi obtenue est quadrillée au doigt, laissée à sécher et retirée sous forme de carrés de 10 cm de côté environ. La pâte subira un séchage ultérieur formant ainsi une croûte de 2 cm d'épaisseur. Le "dié" apparaît comme des petits morceaux verts

feuilletés retenant de grandes quantités de sable par sa face inférieure.

La quasi totalité du "dié" récolté au Tchad est vendue sur les marchés hebdomadaires du Sud Kanem, celui de Dibinintchi semble être le plus important.

La récolte est le fait d'un petit nombre de femmes des villages à proximité des mares, l'autoconsommation est ainsi limitée.

C - ALIMENTATION TRADITIONNELLE.-

Si le blé est parfois consommé à l'occasion des fêtes, si la consommation du maïs s'étend, le repas traditionnel est constitué d'une boule de mil (de maïs)(biri) cuite à l'eau après deux pilages (biri butuku) ou après fermentation dans l'eau froide durant deux jours (biri dammerké). Cette pâte épaisse recouverte d'une calebasse prend la forme d'une boule, elle est toujours accompagnée d'une sauce.

La viande est consommée à l'occasion des fêtes ou de sacrifices, le poisson, par contre, est consommé en grande quantité par les Boudouma en bordure du lac, ils en revendent une partie aux Kanembou.

Six grandes catégories de sauces sont utilisées avec le "biri" :

- sauce à la viande : "dan"
- sauce au poisson : "bini"
- sauce aux haricots : "ngala druku"
- sauce au lait : "karé karé"
- sauce à base de feuilles d'arbres : "kédafé"
- sauce aux spirulines : "dié"

D - CONSOMMATION DES SAUCES AUX SPIRULINES ("dié").-

Sauf en ce qui concerne les femmes enceintes, les Spirulines ne sont consommées dans le Kanem que sous forme de sauce.

Il y a peu de variations dans la composition des sauces "au dié". Quand ceci est économiquement possible, il y est ajouté du beurre fondu, de la poudre de gombo (Hibiscus esculentus) pour lier la sauce, de la poudre de tomate, du piment séché, du sel, parfois un peu de feuilles séchées d'oignons et d'oseille et un peu de farine de mil.

Il peut être ajouté des haricots, ou exceptionnellement de la viande séchée ou du poisson.

Quatre types de sauces aux spirulines sont donc relevés :

- sauce au dié seul
- sauce au dié avec des haricots
- sauce au dié avec du poisson séché
- sauce au dié avec de la viande de l'os.

Les enquêtes ont montré une consommation régulière mais localisée chez le groupe Kanembou du Sud Kanem ; les fréquences de consommation les plus élevées se rencontrent chez les populations de la région de Ngouri et Dibinintchi.

L'utilisation du "dié" est plus important en février qu'en octobre.

Utilisation des différentes sauces :

La sauce aux Spirulines est particulièrement prépondérante en milieu Kanembou rural, en effet : respectivement 80 % des familles en février et 60 % en octobre les consomment plus souvent que les sauces uniquement à la viande ou au poisson (les proportions sont inversées en milieu urbain avec seulement 15 % des cas).

Emploi des différentes sauces aux Spirulines :

- sauce au dié seul 78 %
- sauce au dié avec viande } 13 %
- sauce au dié avec poisson }
- sauce au dié avec haricots 9 %

On ne peut considérer que le "dié" soit un simple condiment, en effet, les quantités mises dans la sauce pour chaque personne se situent entre 9 et 13 g avec des extrêmes de 4 et 24 g ; pour les Kanembou de la région du lac, le "dié" constitue la "mère de la sauce".

Dans la sauce aux haricots, il semble y avoir substitution partielle haricots-spirulines.

Il existe des différences notables en ce qui concerne les quantités consommées par personne et par jour selon les lieux ; en fait ces écarts s'expliquent davantage par des variations dans les fréquences que par les quantités introduites dans les sauces.

Quantité de dié consommée par personne et par jour (1)
(exprimée en g).

	Février	Octobre-Novembre
Ngouri	9,0	8,0
Dibinintchi	5,9	4,2
Mao (zone rurale)	6,2	4,2
Mao (zone urbaine)	2,6	2,3
Mao (Daza)	1,6	1,8
Mondo	3,0	N
Bili	N	3,4

N = non enquêté

Le groupe Kanembou est le principal consommateur de Spirulines et le passage à d'autres ethnies marque souvent l'arrêt de leur consommation de par l'extrême réserve des groupes non consommateurs à l'égard des Spirulines.

Si, d'une saison à l'autre, les fréquences de consommation peuvent beaucoup varier, par contre les quantités de "dié" introduites dans la sauce restent à peu près inchangées.

La diminution du rythme de consommation, notée entre février et octobre peut s'expliquer par la hausse relative du prix du "dié"qui coïncidentavec une relative abondance, la récolte du mil étant récente.

Malheureusement, le "dié" ne semble pas apporter une solution pendant les années de sècheresse, en effet : d'une part, l'assèchement de certaines mares productrices provoque une raréfaction du produit, d'autre part les populations les premières touchées sont les nomades qui ne consomment pas d'algues ; enfin, notons que les Spirulines ne peuvent en aucun cas se substituer aux céréales, tout au plus l'augmentation des sauces au "dié" pourrait compenser partiellement le manque de viande et de poisson.

(1) D'après DELPEUCH-JOSEPH-CAVELIER :
section de nutrition de l'ORSTOM-Yaoundé - CAMEROUN.

E - VALEUR ALIMENTAIRE DU DIE.-

Composition du dié séché (1)
(valeurs extrêmes mesurées suivant le lieu de récolte ou de vente)

	p. 100 (g) de produit brut	p. 100 (g) de poids sec	p.100 (g) de poids sec moins l'insoluble chlorhydrique
Humidité (g)	4,3-12,5	-	-
Protéines (g)	15,2-33,6	16,6-36,2	37,0-57,8
Lipides (g)	0,7-2,9	0,8-3,1	1,4-6,4
Glucides totaux (g) .	8,3-20,1	8,4-21,8	21,0-36,7
Cendres (g)	37,6-63,0	40,9-68,6	10,7-28,1
Insoluble chlorhydrique (g)	26,6-54,7	28,9-59,6	-

Mesure sur 19 échantillons.

La teneur en eau, si elle se situe entre 5 et 9 %, le
s souvent ne dépasse pas 13 %, ce qui favorise une bonne con-
sion du produit.

La teneur en cendres est très élevée 37 à 63 % dont 26
à 55 % de sable, ce qui fait apparaître le produit comme moyen
pour sa teneur en protéines (entre 20 et 30 % M.S.) qui baisse
parfois jusqu'à 16 %.

En ce qui concerne l'apport protéique, le dié se situe
au rang d'une légumineuse moyenne, encore ne faut-il pas ou-
blier le rôle d'anti-aliment que peut jouer le sable passant
dans les sauces.

Apport nutritionnel :

Heureusement les modes de cuisson traditionnels élimi-
nent la plus grande partie du sable collé à la face inférieure
du dié.

(1) D'après DELPEUCH-JOSEPH-CAVELIER :
section de nutrition de l'ORSTOM-Yaoundé - CAMEROUN.

Apport nutritionnel de 100 g de sauce (Poids sec) (1)

	Sauces							
	Dié		Haricots + Dié		Haric.	Pois.	Viande	Karê-Karé
	Fév.	Nov.	Fév.	Nov.				
Protéines (g)	15,5	20,3	19,3	22,3	19,5	25,7	49,2	13,3
Lipides (g)	28,6	29,9	19,2	20,2	16,0	21,4	25,5	34,5
Glucides totaux (g)	28,0	23,2	45,1	39,7	52,5	28,1	7,5	33,7
Insoluble formique(g)	N	13,6	N	9,0	4,7	9,5	4,2	12,1
Cendres (g)	27,9	26,6	16,4	17,8	12,0	24,8	17,8	18,5
Insoluble chlorhydrique (g)	4,8	4,9	1,5	2,2	0,7	2,9	1,3	1,0

N = non mesuré.

Malgré tout, la sauce au dié avec ses 15 à 20 % de protéines n'est pas supérieure à la sauce aux haricots et reste inférieure aux sauces au poisson et surtout à la viande.

De plus, à quantité égale de protéines, la sauce au dié se classe comme l'une des plus chères (sauce au lait mise à part).

(1) D'après DELPEUCH-JOSEPH-CAVELIER : section de nutrition de l'ORSTOM-Yaoundé - CAMEROUN.

PROCEDES DE CULTURE DES ALGUES SPIRULINES

-oOo-

Les algues étant des organismes chlorophylliens assimi-
ent le carbone à partir de gaz carbonique en présence d'une
source d'énergie lumineuse.

Le carbone représente 50 % de la matière sèche de l'al-
ue.

La culture des algues fournit :

- de bonne source de protéines (jusqu'à 75 %/M.S. en milieu de synthèse)
- des protéines de bonne qualité.

Acides aminés contenus dans différents aliments (20).

Acides aminés (g/100g protéines)	Combinaison type	PROTEINES					
		Lait	Oeuf	Boeuf	Farines		Spiruline maxima
					Soja	Arachide	
Lysine	4,2	7,8	6,3	8,4	6,3	3,5	4,59
A.A. soufrés totaux	4,2	3,3	5,4	3,7	3,15	2,4	1,80
Méthionine	2,2	2,4	3,1	2,4	1,37	0,9	1,37
Tryptophane	1,4	1,4	1,7	1,2	1,49	1,1	1,40

- la vitesse de croissance est élevée (jusqu'à 140 kg de M.S./ha/j)
- leur vie en milieu aqueux permet une alimentation aisée
- le contrôle de la croissance est facile avec ces cultures artificielles en milieu synthétique
- mais elles nécessitent un ensoleillement important, éclairement de 25.000 lux au moins.

Le procédé industriel de production de Spirulines com-
te les étapes suivantes :

- culture des algues en bassin,
- récolte et lavage,
- séchage et stockage.

A - MILIEU DE CULTURE (9)(10)(11)(25).-

Les Spirulines peuvent être obtenues en milieu naturel et en culture synthétique contrôlée.

Le milieu naturel est celui du Kanem.

Le milieu semi-naturel est celui de Sosa Texoco ; les Spirulines vivent dans un anneau de 500 ha entourant l'évaporateur solaire et qui sert à stabiliser les sols. Le milieu est contrôlé et permet la récolte d'une tonne par jour de matière sèche.

La culture des Spirulines nécessite un milieu alcalin.
En plus des sels nécessaires à la croissance de l'algue, le milieu de culture contient de grandes quantités de carbonates et de bicarbonates de sodium qui assurent la nutrition carbonée ; celle-ci apparaît alors indépendante de la pression partielle de CO_2.

Pendant la période de photosynthèse, le pH subit une augmentation rapide de 8,5 à 11, valeur peu compatible avec la survie et le développement de l'algue.
Une acidification du milieu est donc nécessaire, réalisée par un barbotage de CO_2 dilué ou non dans de l'air. Bien que théoriquement l'assimilation directe ou indirecte du carbone soit discutée par de nombreux auteurs ; en pratique, comme cette assimilation correspond à la consommation d'une molécule de CO_2 et à la formation d'un ion CO_3^{--}, la quantité d'ions bicarbonates contenus dans le milieu de culture diminue et le pH augmente.

Le barbotage de CO_2 permet de réajuster le pH et de reconstituer la réserve d'ions carbonates.

Cet emploi du CO_2 peut être intermittent et fonction de l'élévation du pH ; il est possible de réduire les pertes en CO_2 en améliorant le contact entre les phases liquides et gazeuses. Comme il est aussi possible d'utiliser des gaz de barbotage quelle que soit leur concentration en CO_2, une application directe est l'utilisation de gaz de combustion du propane comme source de CO_2.

L'alcalinité du milieu de culture des Spirulines constitue un élément très favorable pour la mise en oeuvre de la culture à grande échelle. Pour réaliser la nutrition carbonée il suffit en effet d'assurer initialement une réserve suffisante en ions carbonates dans le milieu de culture et d'alimenter ensuite le milieu de manière à maintenir constante cette réserve. Le transfert du gaz carbonique de la phase liquide à la phase gazeuse se fait avec un très bon rendement étant donné la fixation du gaz carbonique par le milieu.

S BASSINS DE CULTURE (9)(12).

Les bassins pour la culture contrôlée des Spirulines
t être construits d'une manière économique et posséder une
ion suffisante pour une utilisation optimale de la lumière
sels minéraux.

La réaction à réaliser est une réaction photochimique
t être symbolisée par la réaction suivante :

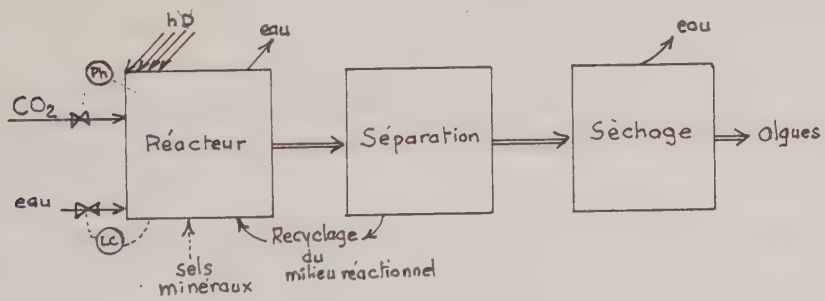
$$CO_2 + x\ H_2O + \text{sels minéraux} \longrightarrow \text{algues}$$

La concentration optimale en algues est de l'ordre de
3 g d'algues sèches par litre.

La vitesse de production d'algues aux températures et
imum est d'environ 15 g/m2/j ce qui correspond à une con-
ion de CO_2 de 12 l/m3/j.

Une agitation du milieu est indispensable afin d'éviter
ttation des algues en surface et de permettre une photo-
se efficace.

Par ailleurs, les considérations économiques imposent
oi de sources de CO_2 bon marché, c'est-à-dire gaz de com-
n de gaz de pétrole liquifié, fuel ou gaz naturel.



Les bilans de CO_2, eau et algues autour du réacteur
t se définir ainsi :

1 - pour le CO_2

Poids de CO_2 injecté en g/h : = S.K.Ø.x

: % du CO_2 absorbé par le réacteur

S : surface du réacteur (m^2) exposée à l'éclairement
Ø exprimé en lux.

k : constante de vitesse $g.h.^{-1}.m^{-2}.lux^{-1}$

x : g de CO_2 correspondant à un g. d'algues.

L'introduction de CO_2 est contrôlée par un pH. mètre.

II - Pour l'eau

eau injectée (g.h.) = eau évaporée + S.K.Ø.y + eau éliminée au séchage

y : teneur en eau des algues sèches.

III - Pour les algues

production : $= K.S.Ø. = V. \frac{dz}{dt}$

z : teneur (g/l) des algues dans le milieu réactionnel (comprise entre 0,5 et 3 g/l)

V : volume total du milieu réactionnel.

A condition que la teneur du milieu en algues reste dans les valeurs ci-dessus, il pourra être effectué un soutirage périodique.

Pour les sels minéraux, un apport discontinu vient compenser la consommation liée au soutirage des algues, ces sels se retrouvent au niveau des algues sèches soit comme constituant, soit sous forme de minéraux restant avec les algues après séchage.

Il a été retenu le principe de réacteur en plein air avec un rapport surface ensoleillée volume très élevé, afin d'utiliser au maximum l'investissement en sels nutritifs contenus dans le réacteur

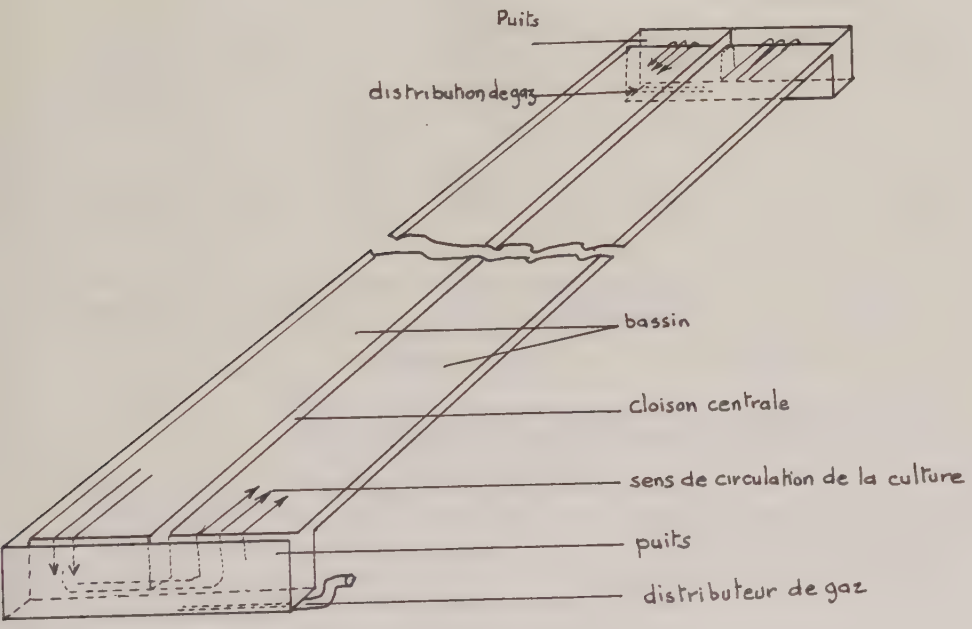
Les problèmes de l'agitation du milieu et du transfert en CO_2 (absorption faible sous une petite profondeur) ont été résolus par l'utilisation de l'énergie contenue dans le gaz de combustion au moment de son injection dans le bassin. Mais l'injection d'un gaz de combustion sous une profondeur de quelques centimètres conduit à une absorption très faible de CO_2, de plus, l'agitation mécanique de bassins de grande surface est difficile à résoudre en pratique.

Le principe retenu consiste à adjoindre à un bassin peu profond exposé au soleil un ou plusieurs petits puits dans lesquels est effectuée l'injection de gaz.

Dans le cas de l'unité représentée, à un bassin peu profond (20 x 4,5 x 0,07 m) sont ajoutés deux puits de 1,10 m de profondeur situés à chaque extrémité et prenant toute la largeur ;

bassin et puits sont divisés sur toute la longueur du réacteur par une cloison centrale. La communication entre ces deux parties se trouve au fond du puits où un passage est réalisé en arrêtant la cloison à 0,40 m du fond.

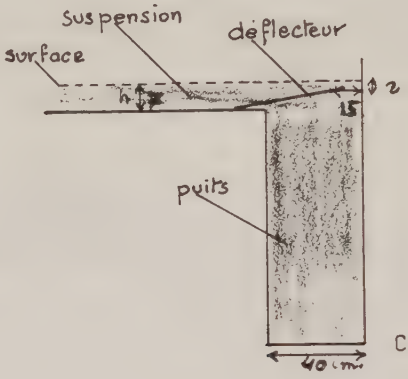
L'injection du gaz de combustion est réalisée dans chaque puits au niveau de l'un des compartiments, la circulation du milieu est alors obtenue par effet "air-lift", mouvement entretenu par l'alternance des parties du puits avec et sans injection de gaz.



La solution retenue pour l'injection des gaz est une plaque de métal fritté (acier inoxydable ou céramique) d'une longueur égale au compartiment et située au fond du puits.

Les zones en surface au-dessus des puits descendants sont plus ou moins stagnantes du fait des changements de direction de l'écoulement, les algues viennent s'y concentrer par

flottage. Soit ce phénomène est utilisé comme préconcentration pour la récolte, soit l'utilisation d'un déflecteur permet par accélération locale d'éviter ce flottage.



Cotes en cm.

Les teneurs en CO_2 des gaz brûlés varient de 10 à 12 % en volume avec pour des puits de 1,60 m un taux d'absorption de 94 % ; dans la pratique, une profondeur de 1.10 m permet d'obtenir une absorption située entre 80 et 90 %.

Pour fixer l'épaisseur h de liquide un compromis doit être trouvé entre les phénomènes suivants :

- si h est trop grand, la vitesse linéaire des algues dans le milieu réactionnel devient trop faible pour empêcher le flottage des algues.

- si h est trop faible, les exigences nécessaires à l'horizontabilité du bassin sont irréalisables en pratique.

- afin d'éviter une trop grande variation du milieu réactionnel durant la nuit, il faut une valeur minimale de h pour obtenir une inertie thermique suffisante.

C'est ainsi qu'une hauteur comprise entre 5 et 10 cm est à retenir, la profondeur de 7 cm s'est montrée satisfaisante.

C - CONCENTRATION ET FILTRATION DES SPIRULINES (9).

Qu'elles proviennent de l'anneau extérieur de l'évaporateur solaire de Sosa Texcoco ou d'un bassin de culture synthétique, les Spirulines doivent être concentrées avant d'être lavées puis séchées.

La forme et la taille des algues permettent d'employer tout simplement la filtration.

La séparation des algues du milieu réactionnel est réalisée au moyen d'un filtre plan incliné, on recueille ainsi une suspension très concentrée par simple gravité et avec un faible coût.

La filtration proprement dite est réalisée soit avec un filtre rotatif à tambour (faible dépression, court temps d'immersion du tambour, essorage prolongé) soit avec un filtre horizontal muni d'un vide partiel.

Les Spirulines sont lavées sur le filtre afin d'éliminer les sels minéraux du milieu de culture.

D - SECHAGE DES SPIRULINES.

Le gateau d'algues obtenu sur le filtre contient encore 81 à 83 % d'eau, le séchage est effectué soit par des rouleaux chauffants soit par atomisation, techniques couramment utilisées dans l'industrie alimentaire.

Notons que les Spirulines n'étant pas fermentescibles, il n'existe pas de problèmes de fermentation.

E - PRODUCTION DES SPIRULINES.

Dans les zones les plus favorables qui se situent entre 35° de latitude N et S, la production est d'environ 12 g/m^2:J. d'algues sèches, soit environ 40 tonnes /ha/an d'algues sèches ou 28 tonnes/ha/an de protéines.

Actuellement, des bassins fonctionnent à la Martinique, en Egypte avec le "Egyptian petroleum Research Institute" du Caire, et au Japon par la société Asahi Carbon.

F - MICROFLORE DE DIFFERENTES PREPARATIONS EN SPIRULINES.

A - Examen microbiologique (voir tableaux).

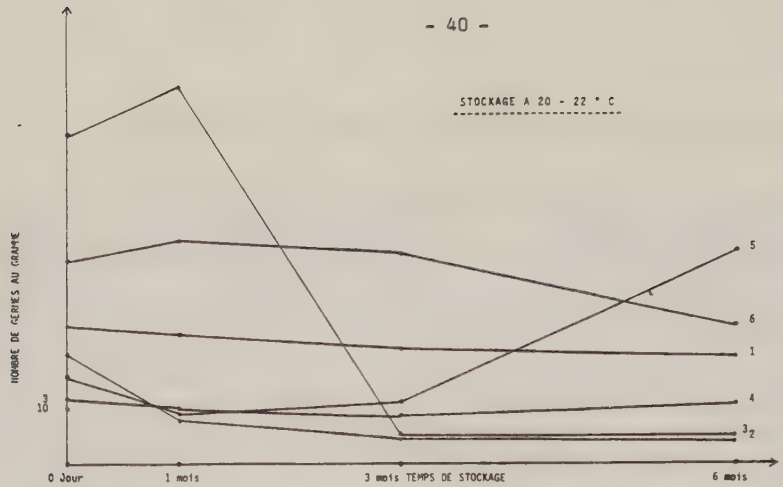
L'examen microbiologique est indispensable, il donne une indication sur la présence des Protozoaires, diatomées, autres algues, nématodes insectes... qui peuvent se trouver présents surtout dans les préparations liquides.

NOMBRE DE GERMES AU GRAMME DE DIFFERENTES PREPARATIONS DE SPIRULINES

Code	Origine	Flore mésophile revivifiable		Colif.	Indolog.	Producteurs d'hydrogène sulfuré	Strep. fécaux	Anaérobies Sulfi. réduc.
		Aérobie	Anaérob.					
Dihé	Lac Tchad	405.000	20.000	100 à 1000	1000	Plus de 1000	1000	20
ALB_5	Préparation en bassin originaire d'algérie	170.000	7.000	10 à 100	10 à 100	100 à 1000	1000	5
MR_8	Algues du Mexique, lavées, séchées, atomisées ; à partir de plaques flottantes à la surface de la partie A_3.....	43.000	1.800	100	-	10 à 100	1000	0
MR_{13}	Même origine que MR8, séchées sur rouleaux	58.000	17.000	1000	-	-	750	0
MA_2	Mexique. Algues récoltées dans l'évaporateur solaire, lavées et atomisées. Non stabilisées .	41.000	500	<10	-	-	10 à 100	<4
MA_4	Culture synthétique dans bassins de 100 à 700 m^2	700	510	<10	<10	<10	10 à 100	<4
MA_5	Culture synthétique en bassin 500 m^2.....	9.700	650	<10	<10	<10	10 à 100	<4
MA_6	Bassin A_3 de l'évap. solaire de Sosa Texococo Spirulines atom..	21.000		1000	-	-	100	0
MA_7	Pomp. des Saumures du bassin A_3	25.700	700	<10	<10	1000	1000	2
MA_7bis	Pomp. des saumures du bassin A3.....	17.300	1.300	<10	<10	10	1000	8
MA_9	Même origine et même préparation que MA_7 bis, mais lot de 1 T..	20.000	3.000	10 à 100	10	10 à 100	1000	8

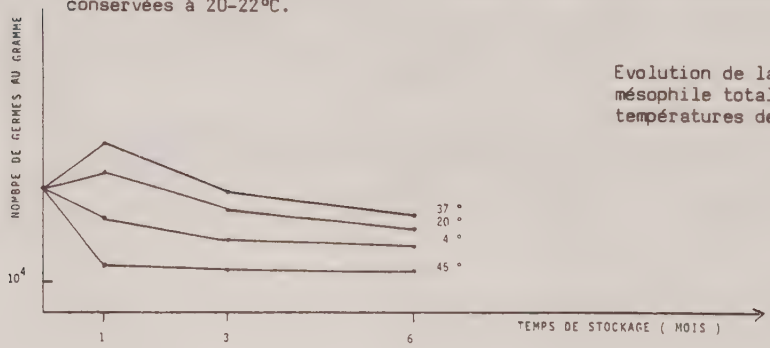
Code	Origine	Flore mésophile revivifiable		Colif.	Indol.	Producteurs d'hydrogène sulfuré	Strep. fécaux	Anaérobies Sulfi. réduc.
		Aérobie	Anaéro.					
A_{10}	Spirulines atom. du bas. A_3 de l'évap. solaire ..	27.500	10.200	100 à 1000			750	10
$A_{10}D$	Même origine, mais alg. décol. par IFP-Sol.....	380.000	85.000	1000 à 10000			1800	0
D_1	Alg. de même origine décol. au Mexique	720.000	117.000	10.000	-	-	450	0
A_{12}	Algues de l'évap. sol. et séchées par atomisation	63.000	5.200	100	-	-	1000	0
m	Algues desséchées à Sosa Texcoco à la sortie du moulin	90 000	30.500	0	-	100	600	10
s	Algues après séchage sur rouleaux	780.000	480.000	0	-	100	130	10
t	Algues ayant subi un traitement spécial de broyage en fines particules (15 µm de diamètre)	760	760	25	-	100	12	10
1	Bac de culture de Rueil 5 M2 gaz comprimé, lyophylisés, non stabilisés	800	320	10	10	10	10	1
G^2	Bac de culture de Rueil. Gaz de combustion	500	40	Idem	Idem	Idem	Idem	Idem

D'après J. Jacquet : Laboratoire de Microbiologie U.E.R. des sciences de la Vie et du Comportement ; Institut du Lait, des Viandes et de la Nutrition, CAEN.



Evolution du nombre de germes anaérobies totaux dans différentes préparations en poudre stockées à 20-22°C.

Evolution des enterocoques dans différents échantillons de spirulines, conservées à 20-22°C.



Evolution de la flore aérobie mésophile totale, à diverses températures de stockage.

C'est le cas du dihé du Tchad où, à l'état frais, de nombreuses espèces de Protozoaires sont décrites. Dans les bassins de Mexico, mais également dans une moindre mesure dans les bassins expérimentaux de Rueil, où les Spirulines sont plus fragmentées, ou au contraire s'organisent en longs filaments, existent quelques rares Chlorelles, des diatomées ; à certains moments, on note une invasion de Protozoaires, notamment des Stylonychia mytilus et Spiromonas angusta, qui se nourrissent aux dépens des algues Spirulines.

Cela n'est pas surprenant, en effet rappelons que les cultures sont à ciel ouvert et donc soumises à toutes contaminations possibles.
Le milieu ne peut donc ni être à l'abri des prédateurs ni être stérile ; sa seule défense est son pH élevé.

Bien que des amibes dysentériques n'aient jamais été mises en évidence, il y a lieu d'exercer à ce sujet une surveillance constante.

Il n'a pas été relevé de bactéries franchement pathogènes, cependant il est à noter l'existence dans un échantillon et en très petite quantité de Shigella sonnei, mais si cette espèce est capable de provoquer parfois des intoxications alimentaires, elle ne le peut que si elle se trouve en très grande quantité, ce qui n'est pas le cas ici.

Il n'a jamais été isolé de Aspergillus flavus et, à fortiori, il n'a jamais été dosé d'aflatoxine dans les différentes préparations.

Notons que les différentes manipulations y compris la décoloration, qui pourtant favorise l'acceptabilité pour les occidentaux, ont l'inconvénient d'augmenter sensiblement le nombre de germes (échantillons MA 10, MA 10D, MD_1).

Une fois que les Spirulines ont été desséchées, la microflore qui y est associée décroît régulièrement, ceci pour toutes les flores et quelles que soient les températures de stockage.
Phénomène déjà très important avec les aérobies totaux, il s'agit d'un véritable effondrement avec les germes coliformes et surtout les streptocoques fécaux qui disparaissent au bout d'un mois ; seuls les aérobies semblent se maintenir un peu mieux au cours du temps.

B - Activité antibiotique (22)(27).

Bien que Martinez-Nadal ait mis en évidence une certaine activité antibiotique contre certaines espèces de champignons, de bactéries de levures, liée à la présence de stérols et que

Clément confirme le fait par la cristallisation de produits actifs, Jacquet ne constate que de manière irrégulière un certain pouvoir antimicrobien et considère le terme d'activité antibiotique comme inapproprié.

TRAITEMENT INDUSTRIEL DES ALGUES SPIRULINES

-oOo-

Les Spirulines, aliment à teneur élevée en protéines, sont très colorées.

Les pigments contenus comportent trois classes :

- les complexes de chlorophylle - a
- les caroténoïdes et les xanthophylles
- la phycocyanine et phycoerythrine.

Citons pour mémoire, les cytochromes et les plastoquinones nécessaires au transport de l'activité photosynthétique.

Les teneurs sont de :

Carotènes : 1,4 à 1,6 g/kg de M.S.
Xanthophylles : 1,5 à 2,0 g/kg de M.S.

Les analyses, qu'elles soient effectuées sur S. maxima ou sur S. platensi ont fourni les mêmes résultats.

Les Spirulines entières ou les fractions colorées que l'on en extrait, sont des colorants naturels utilisables en alimentation animale en vue de la pigmentation des poulets, du jaune d'oeuf...

A - DECOLORATION DES SPIRULINES HUMIDES (2).

Les problèmes posés sont les suivants :

- conserver et si possible améliorer la qualité de l'aliment,
- obtenir une poudre facilement incorporable, c'est-à-dire incolore et organoleptiquement neutre,
- ne choisir que des traitements industriellement concevables et d'un faible coût.

A la sortie du bassin, le gateau d'algues est filtré ou centrifugé, puis lavé. Après filtrage, il est obtenu une substance contenant 80 à 85 % d'eau.

A ce stade, il est possible d'extraire les phycobilines et elles seules en milieu aqueux, le meilleur rendement d'extraction est obtenu avec l'eau du robinet additionnée de 40 g/l. de Na Cl à un pH situé entre 6 et 9.

A ce niveau, les deux autres catégories de colorants ne sont pas encore extraites, et la poudre après séchage a toujours les mêmes aspects et même couleur qu'au départ.

B - DECOLORATION DES SPIRULINES SECHES (2).

S'il n'est pas possible de décolorer de manière suffisante les Spirulines en travaillant exclusivement en milieu aqueux, une décoloration suffisante peut être obtenue à la suite de l'extraction des pigments restants, à l'aide de solvants organiques convenablement choisis.

Parmi les 6 solvants originellement retenus (éthanol, acétone, isopropanol, dichloroéthane, heptane, hexane) seuls acétone et éthanol ont à la fois une efficacité suffisante et permettent d'effectuer la décoloration à une température inférieure à 80° sans modifier les qualités des protéines des Spirulines.

L'efficacité des solvants à une température donnée décroissant au cours du temps, il est obtenu au bout de 3-4 heures une poudre couleur "jaune moutarde clair" qui peut être incorporée dans un grand nombre d'aliments.

Un pré-traitement ayant pour but de rompre les structures des membranes algales et d'accélérer le passage de l'appareil pigmentaire dans le solvant est envisageable. Par exemple :

- broyage au mortier
- utilisation de mixer
- congélation
- lyze enzymatique des parois
- plus simplement action d'un milieu fortement hypotonique comme l'eau distillée.

Ces pré-traitements ne semblent pas nécessairement indispensables, car il n'apparaît pas de différences significatives au niveau industriel, de plus cette étape supplémentaire augmente les coûts.

En revanche, les conditions de séchage ont leur importance ; les produits obtenus par atomisation se sont avérés plus homogènes et par conséquent plus vite décolorés que les produits obtenus par séchage sur rouleaux.

C - CARACTERISTIQUES DES SPIRULINES DECOLOREES.

1 - Propriétés organoleptiques.

Il s'agit d'une poudre jaune clair, presque inodore, de granulométrie très fine, ayant un "goût d'algues" très faible par rapport aux Spirulines initiales.

2 - Composition chimique.

Teneur en protéines brutes (N x 6,25)

Spirulines avant décoloration	64,2 %
Poudre décolorée	84,2 %
Perte azotée protéique dans la fraction colorée	0,28 %
Rendement de préparation	80 %

Aminoacidogramme (1)

	Poudre décolorée g.p. 100	Spirulines sèches g.p. 100
Isoleucine	6,6	6,02
Leucine	10,1	8,65
Lysine	5	4,53
Méthionine	2,8	2,45
Cystine	0,76	0,96
Phénylalanine	5,1	4,40
Tyrosine	5,1	4,54
Thréonine	5,4	5,14
Tryptophane	1,58	1,61
Valine	7,5	8,56

La poudre décolorée représente une source de protéines importante (de 80 à 85 %) où la lysine est disponible à 90 %.

Les lipides initialement présents dans les Spirulines sont pour la plupart éliminés avec la fraction colorée.

Les glucides y sont globalement en quantités plus faibles que dans les Spirulines du début.

3 - Problèmes posés par les solvants résiduels.

Les déterminations effectuées en chromatographie en phase gazeuse donne les résultats suivants :

Acétone 40 ppm
Ethanol 60 ppm

(1) D'après C. BARON et Co. : Laboratoire de Biochimie appliquée à l'E.N.S.B.A.N.A.

Les résidus tolérés dans l'industrie alimentaire étant de 100 ppm, les valeurs relevées sont donc acceptables.

Avant d'envisager les utilisations possibles des Spirulines séchées, il importe de voir s'il existe des produits dangereux ou susceptibles de l'être dans le produit obtenu.

D - RECHERCHE ET DOSAGE DE DIVERS TOXIQUES DANS LES ALGUES SPIRULINES.

I - Nature et devenir de l'heptadecane (35).

Les hydrocarbures constituent près de la moitié de la fraction de l'insaponifiable des algues spirulines, soit 0,1 à 0,3 en poids le n-heptadecane en est le constituant majeur (65 %).

Compte tenu qu'il existe un nombre très restreint de travaux portant sur le métabolisme des hydrocarbures chez les animaux supérieurs, il a été étudié le devenir de l'heptadecane, constituant majeur de cette fraction, lorsqu'un régime renfermant des algues spirulines est administré au rat et au porc durant de longues périodes. Son accumulation a été suivie dans la carcasse et différents tissus, ainsi que son passage éventuel dans le lait de la truie.

1) Méthodes.

L'heptadecane a été mesuré après saponification des tissus par la potasse méthanolique, extraction de l'insaponifiable par l'hexane, chromatographie de l'extrait sur colonne puis séparation de l'heptadecane par chromatographie en phase gazeuse.

Deux lots de rats Wistar furent nourris à volonté durant deux ans avec un aliment renfermant 25 % d'algues soit 280 ppm d'heptadecane.

Les mesures ont également porté sur deux lots de douze truies servant à l'étude des algues spirulines durant les phases de croissance gestation et lactation. L'un des lots recevait des rations comparables au lot témoin mais renfermant 5 % de spirulines soit une alimentation à 52 ppm d'heptadecane.

2) Résultats et discussion.

a) Nature des hydrocarbures.

	MA 7	MR 8	RL 1	RLG 2
Insaponifiable (mg/g)	7,72	5,57	5,83	7,87
Hydrocarbures totaux (mg/g)	1,56	2,01	3,3	2,89
Heptadecane en % des hydrocarbures totaux	80	67	64	65

MA 7 = Mexique atomisée
MR 8 = Mexique sur rouleaux
RL 1 = IFP Rueil CO2 en bouteille
RLG 2 = IFP Rueil CO2 gaz de combustion

Il ressort des résultats obtenus que les hydrocarbures constituent une part importante de l'insaponifiable et environ 0,1 à 0,3 % en poids des algues totales ; de ce point de vue, il existe une certaine analogie avec les "single-cell" protéines issues de cultures de levures sur alcanes qui peuvent contenir de 0,08 à 0,5 % d'hydrocarbures résiduels selon le procédé de fabrication.

b) Accumulation de l'heptadecane chez le rat.

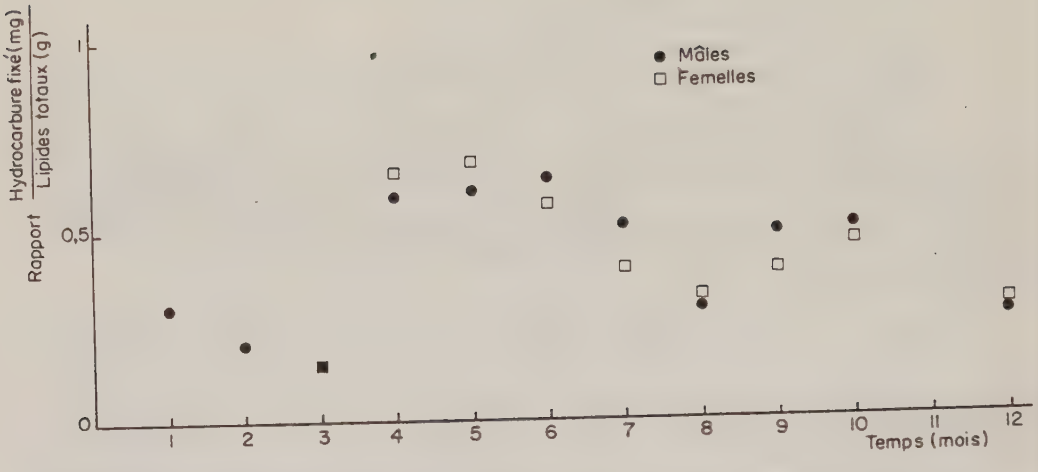
Au départ les carcasses ne contiennent qu'une part minime de cet hydrocarbure (moins de 0,1 ppm) ; les aliments autres que les spirulines n'en renferment qu'une quantité négligeable (moins de 0,1 ppm).

Le tableau indique les quantités résiduelles mesurées sur des carcasses entières broyées et lyophylisées.

Evolution de la teneur en heptadécane du Rat soumis à un régime comportant 25 p. 100 d'algues Spirulines.

Durée d'administration du régime à 25 p. 100 d'algues Spirulines (mois)	Heptadécane fixé dans la carcasse (mg)		Lipides totaux p. 100	
	Mâles	Femelles	Mâles	Femelles
1	4,3	-	5,7	-
2	5,8	-	7,4	-
3	5,6	4,8	12	13,4
4	28,3	12,4	10,6	8,2
5	24,6	18,9	7,8	10,4
6	32,4	16,5	10,7	12
7	37,1	12,7	14,8	13,5
8	24,2	12,8	17,6	14,6
9	49,0	21,7	19,3	19,6
10	31,9	28,2	11,8	18,4
12	25,0	19,2	16,9	19

TULLIEZ and coll : INSERM - U 122 - Faculté de Pharmacie - CHATENAY-MALABRY



Evolution du rapport heptadécane fixé (en mg) sur lipides totaux (en g).

Si l'on observe un accroissement progressif des quantités d'heptadécane fixées dans la carcasse avec un plateau à partir du 4ème mois, en fait le rapport heptadécane fixé sur lipides totaux évolue peu au cours des 12 mois et de ce fait il est possible de dire que cette rétention suit l'accroissement des réserves lipidiques de l'animal.

En valeur absolue les quantités fixées représentent 0,05 % des quantités ingérées, c'est-à-dire que l'heptadécane est assez largement métabolisé par le rat.

La fixation, au niveau des tissus, montre une nette préférence au niveau des graisses, ce qui explique la constance du rapport heptadécane fixé sur lipides totaux ; les quantités mesurées dans les poumons sont importantes et sans rapport avec la teneur de ces organes en lipides.

c) Accumulation de l'heptadécane chez le porc.

Le tableau suivant montre que l'hydrocarbure considéré se fixe préférentiellement au niveau des graisses mais de manière peu marquée si l'on se rappelle qu'il s'agit du tissu où la fixation est maximale.

	Foie	Muscle	Graisses
Témoin	0,01	0,06	0,17
"Spirulines" *	0,01	0,055	4,90

* Moyenne sur cinq animaux.

Les concentrations mesurées dans les prélèvements de lait de truies effectués au 21 ème jour de lactation sont les suivantes :

Lait issu de témoins = 0,17 ppm
Lait issu des truies "spirulines" = 1,62 ppm

L'heptadécane est donc éliminé par cette voie, qu'il provienne soit directement de l'alimentation, soit de la mobilisation des graisses de réserves.

d) Conclusion.

Compte tenu de ce que l'on sait de la toxicité des hydrocarbures, il n'est pas à craindre de phénomène de toxicité aiguë ou chronique. Cependant, nous ignorons le métabolisme des hydrocarbures à nombre d'atomes plus élevés qui ont une tendance plus marquée à s'accumuler.

II - Recherche du 3,4-benzopyrene (BaP) (6).

L'I.F.P. ayant utilisé à titre expérimental un enrichissement du milieu de culture par la combustion d'hydrocarbures, le problème se pose de connaître le devenir des hydrocarbures aromatiques dont on connaît la présence dans les gaz de combustion.

Une méthode originale de dosage mise au point au laboratoire (mais non publiée) permet de doser 0,5 ppb de BaP et de détecter 0,1 ppb.

Les résultats obtenus avec différents lots et exprimé en µg de BaP par kilogramme d'algues séchées (5 à 7 % d'humidité) sont les suivants :

Algues spirulines du Mexique ..... 3,8 ppb
(séchage par atomisation)

Algues spirulines du Mexique ..... 2,6 ppb
(séchage sur rouleaux)

Algues spirulines cultivées en milieu artificiel ..... 3,6 ppb
(CO_2 en bouteilles)

Algues spirulines cultivées en milieu artificiel ..... 2,6 ppb
(CO_2 issu de gaz de combustion purifié par filtration).

Les concentrations en BaP sont donc très faibles dans les différents lots. La purification par filtration des gaz de

combustion permet de ne pas amener de contamination particulière en hydrocarbures aromatiques polycycliques.

Si les chiffres trouvés ci-dessus sont comparés avec ceux concernant différents aliments, il est possible d'estimer que les valeurs trouvées dans les algues spirulines sont faibles.

	3,4-benzopyrène µg/kg de matière ou ppb
Salade	12
Epinard	12
Endive	50
Poireau	6,6
Morue	15
Algues	60
Plancton	5,5
Levures d'alcanes	0,5 à 3,5

Dans de nombreux produits alimentaires, il est trouvé un grand nombre d'hydrocarbures polycycliques aromatiques, dont plusieurs d'entre eux sont réputés pour leurs propriétés cancérigènes. En raison des problèmes posés par leur analyse d'une manière à la fois très sensible et spécifique, les déterminations n'ont pu être étendues aux hydrocarbures aromatiques polycycliques autres que le BaP dont la mesure donne cependant une bonne indication de la contamination des produits par cette famille de substances.

III - Recherche de différents toxiques minéraux (7).

. De nombreux micro-organismes possèdent la propriété de concentrer et d'accumuler sélectivement des éléments dont certains sont des toxiques minéraux. D'où l'intérêt de doser les principaux toxiques métalloïdes et minéraux dans différents lots d'algues spirulines.

TABLEAU 1

Teneurs des spirulines en toxiques minéraux (en ppm) (*).

Algues	Plomb	Arsenic	Sélénium
Tchad	3,7	1,8	0,11
MA_5	3,7	0,3	0,15
MA_6	1,9	1,6	0,24
MA_7	2,8	6,3	0,10
MA_9	1,2	4,4	0,19
MA_{10}	0,6	7,0	0,32
MA_{10}^D	2,4	0,6	0,26
MA_{12}	2,1	4,8	0,39
MR_8	5,1	2,9	0,17
MR_{13}	1,7	8,5	0,14
RL_1	0,60	0,06	0,01
RLG_2	0,25	0,05	0,01

Algues	Fluor	Mercure	Cadmium
Tchad	370	0,48	-
MA_5	152	0,17	0,20
MA_6	285	0,36	0,11
MA_7	100	0,32	0,20
MA_9	130	0,30	-
MA_{10}	553	0,39	0,11
MA_{10}^D	106	1,78	1,0
MA_{12}	76	0,87	0,20
MR_8	630	0,51	0,45
MR_{13}	420	0,75	-
RL_1	140	0,27	-
RLG_2	130	0,22	-

Nature des échantillons :

- des spirulines du Tchad récoltées de manière artisanale et renfermant des quantités non négligeables de sable.

- des échantillons provenant de l'évaporateur solaire de la société Sosa Texcoco, séchées par atomisation (M A) ou par rouleaux (MR).

- des algues cultivées en bassin sous courant de CO_2 provenant de bouteilles (RL_1)
  de la combustion d'hydrocarbures (RLG_2)

- des algues issues du lot MA_{10} et décolorées par l'alcool ($MA_{10}8$).

Remarques :

Il existe de grandes différences de pollution par les minéraux selon les lots.

Les lots RL_1 et RLG_2 (cultures en bassins) étant systématiquement les moins pollués, il est mis en évidence l'origine tellurique de ces minéraux.

Le procédé de décoloration enrichit les spirulines en métaux lourds (cadmium, mercure, plomb) amenés par le réactif de décoloration même si celui-ci ne les contient qu'en très faibles quantités ; par contre, il diminue la teneur en arsenic et fluor.

Essais sur le rat :

Caractéristiques des régimes utilisés :

(*)

Régime "témoin"		Régime "Spiruline" (Spirulina maxima)	
	(protéines %)		(protéines %)
Blé	70 % 6,3	.....	59 % 6
Son	3 % 0,3	.....	3 % 0,3
Caséine	14 % 14	Spirulines	25 % 14,25
Levure	4 % 2	.....	4 % 2
Total	... 22,6	Total	22,6
Huile de Mais	5 %	.....	5 %
Complément Minéral	3,6 %	.....	3,3 %
Cystine	0,3	.....	0,2 %
Lysine	-	.....	0,5 %
Méthionine	0,1	.....	-

Teneur en toxiques minéraux (en p.p.m)		
0,03	Arsenic -	1,3
22	Fluor	112
0,08	Sélénium -	0,26
0,09	Cadmium -	0,09
0,01	Mercure -	0,10
0,60	Plomb	0,52

Eau et régime furent fournis à volonté durant toute l'expérimentation (19 ½ mois) la croissance pondérale a été mesurée durant les 75 premières semaines.

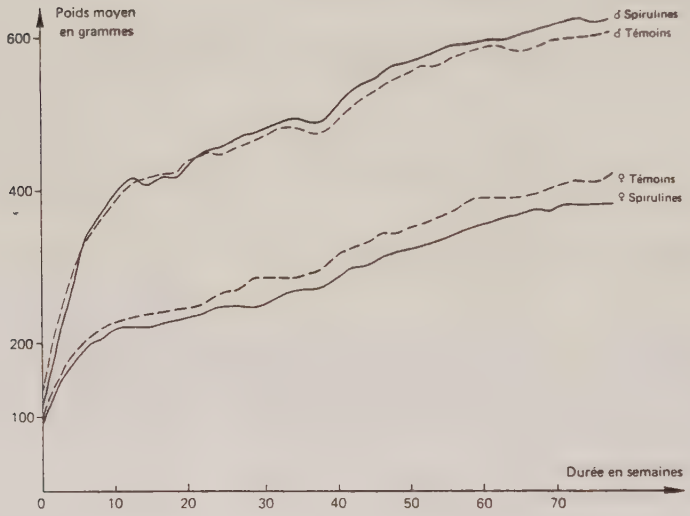
Résultats obtenus :

* Prise de nourriture moyenne et spontanée

Mâles témoins 13,6 g/j.
Mâles "spiruline" 14,5 g/j.
différence statistiquement significative ($P < 0,01$)

Femelles: moyenne de 10 g/j.

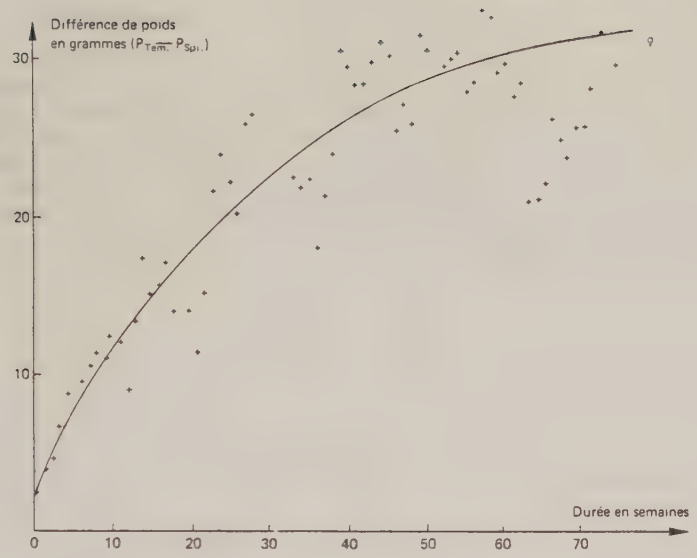
* Croissance pondérale :



Courbe de croissance pondérale.

(*)

Chez les mâles la prise de spirulines n'affecte pas la croissance ; par contre, chez les femelles, la prise de poids est moins rapide chez les lots "spirulines". L'écart de poids augmente puis se stabilise à environ 30 g à partir de la 30ème semaine.



ion de la différence de poids entre les rats témoins et les rats spirulines (cas des femelles)(*).

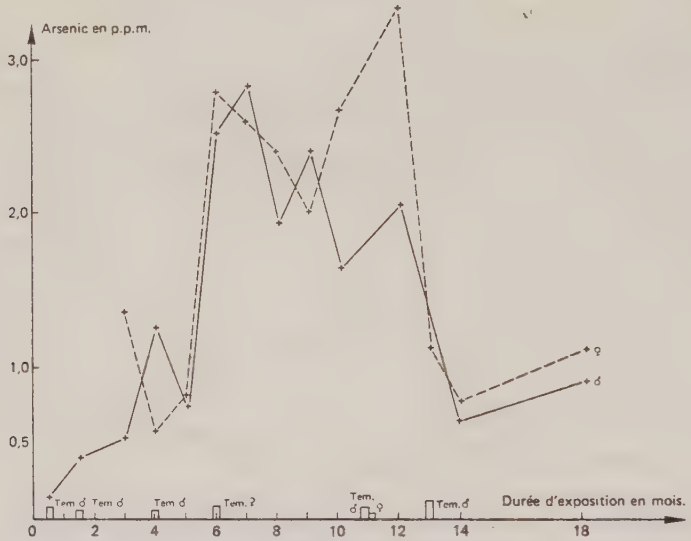
* Pouvoir cumulatif de certains toxiques minéraux :

Rappelons que les lots de spirulines possèdent une te- levée en arsenic et fluor, aussi est-il intéressant de l'évolution des teneurs des carcasses de rats en ces léments.

- Arsenic.

Si les carcasses des lots témoins n'ont jamais dépassé le e 0,2 ppm, par contre, les lots "spirulines" ont vu leur augmenter jusqu'à 3 ppm le troisième mois avant de dé- e à partir du 12ème mois pour finalement se stabiliser entours de 1 ppm.

A la dose de 1,3 ppm dans la ration, l'arsenic a donc un pouvoir cumulatif.



Teneurs corporelles en arsenic chez les rats soumis aux spirulines (*)

- Fluor.

Les différentes mesures effectuées tant sur les tissus (y compris les os) qu'au niveau anatomo-pathologique n'a pas permis de mettre en évidence un pouvoir cumulatif du fluor chez le rat aux doses de 112 ppm.

- Sélénium, cadmium, mercure, plomb.

Les contrôles n'ont pas montré de différences significatives entre les différents lots pour ces quatre éléments.

(*) BOUDENE and Coll : INSERM - U 122 - Faculté de Pharmacie : CHATENAY-MALABRY.

E - CONCLUSION.

Nous avons vu qu'après les traitements subis afin de permettre leur incorporation dans les aliments industriels, les algues spirulines ne semblent pas présenter de grands dangers sinon au niveau de certains métalloïdes. Les cultures en bassins permettent de limiter leur apport, il appartient maintenant de voir dans quelles mesures l'incorporation de spirulines dans l'alimentation est susceptible de modifier les performances zootechniques de nos animaux domestiques.

ESSAIS D'INCORPORATION DE SPIRULINE (SP. MAXIMA) DANS L'ALIMENTATION

-oOo-

A - DANS LES ALIMENTS DES PORCS (15).

Deux modèles de choix furent retenus :

- d'une part le porcelet de dix jours sevré précocement car ce jeune animal est très sensible à la qualité des aliments,
- d'autre part, la truie multipare sensible à tout élément susceptible d'agir sur sa fécondité et sa prolificité.

Toutes les algues utilisées provenaient du Mexique et leur séchage était effectué soit par atomisation, soit sur rouleaux (MR).

Tous les échantillons utilisés présentent une teneur élevée en protéines brutes et une teneur élevée en matières minérales.

Calcium	(g/kg)	1,05	1,22
Sodium	(g/kg)	18,47	22,71
Potassium	(g/kg)	19,44	20,39
Phosphore	(g/kg)	9,20	8,30
		Lots MA 6	MA 11

Cette forte teneur en éléments minéraux notamment sodium et potassium laisse présumer un lavage insuffisant après extraction ; il est déjà possible de dire que les porcs n'ont pas bénéficié des meilleurs échantillons qu'il est possible d'obtenir.

I - Composition des algues utilisées :

Composition en acides aminés (Spirulina maxima)
Teneurs en g pour 16 g d'azote.

Référence	MA 6 *	MR8 (1)	MR8 (2)	(3)	(4)	Lait de truie (5)
Taux protéique N x 6,25/M.S. (%)	62,7	59,1	59,1	60,7	67,5	27,8

Référence	MA 6 *	MR8 (1)	MR8 (2)	(3)	(4)	Lait de truie (5)
Acides aminés indispensables :						
Lysine	4,25	3,95	3,9	4,59	4,53	7,75
Histidine	1,5	1,50	1,4	1,77		2,70
Arginine	6,15	7,60	7,3	6,5		5,0
Thréonine	4,6	4,3	4,4	4,56	5,14	4,3
Isoleucine	5,65	5,8	5,1	6,03	6,02	4,25
Leucine	8,10	7,9	7,6	8,02	8,65	8,9
Tyrosine	4,15	3,85	3,9	3,95	4,54	4,15
Phénylalanine	4,20	3,9	3,9	4,97	4,40	4,15
Méthionine	2,10	1,85	1,75	1,37	2,45	2,10
Cystine	1,13	0,75	0,74	0,40	0,96	1,80
Valine	5,10	6,0	5,8	6,49	8,56	6,2
Tryptophane	-			1,40	1,60	
Σ A.A.I.	46,93	47,40	45,79	50,05		51,30
Acides aminés non indisp. :						
Acide aspartique	9,6		9,8	8,6	-	8,55
Serine	4,5		4,4	4,20	-	5,5
Acide glutamique	15,6		16,3	12,6	-	21,25
Proline	3,8		3,4	3,9	-	12,2
Glycine	4,75		4,2	4,75	-	3,45
Alanine	6,60		5,8	6,8	-	3,85
NH_3						
Σ A.A.I./ΣA.A.T. (%)	51,13		51,05	55,06		48,35

(1) Pion. 1972. Communication
(2) T.N.O. Hollande
(3) Clément et al., 1967.
(4) Clément, 1975.
(5) Duée et Jung, 1973. Lait de Truie à 10 jours de lactation

* Station de Recherche sur l'Elevage des Porcs. I.N.R.A. - C.N.R.Z. 78350 JOUY-en-JOSAS.

Composition des algues spirulines (Spirulina maxima)

Référence	MA 6	MA 11	MR 8 a	MR 8 b	MA	M	*	**
Réception	11/71	03/75	10/73		01/74	03/74	-	-
Quantités (kg)	465	250	75		100	600		
p.100								
Matière sèche	93,06	91,96	90,00	91,42	95,67	94,00	91,7	95,08
Matières minérales	9,76	10,71	9,25	8,82	7,06	7,01	-	6 à 9
Azote total	9,33	8,56	8,47	8,69	9,30	8,08	8,9	10,4
Protéines brutes N x 6,25	58,34	53,32	52,96	54,31	58,16	50,49	55,63	64,2
Cellulose Weende***	4,45	4,42	-	-	-	3,76	-	-
Energie brute Cal/g	4.706	4.640	4.516	4.595	4.970	5.044	-	-

* Clément G., Giddey D , Menzi R., 1967
** Clément G., 1975.
*** Il s'agit ici du résultat de l'application aux algues du dosage de la cellulose par la méthode Weende. Ceci ne signifie pas que les algues renferment de la cellulose au sens biochimique du terme.

II - Alimentation du porcelet :

1) Caractéristiques des régimes utilisés.

A chaque fois les porcelets furent sevrés à l'âge de 12 jours et soumis à un aliment expérimental type 1er âge jusqu'à la troisième semaine puis de la troisième à la 9ème semaine à un aliment de type 2ème âge.

Tous les aliments ont été additionnés de 0,3 % d'oxyde de chrome afin de mesurer la digestibilité.

Composition et analyse des aliments (*)
Porcelets premier âge.

	Expérience 1		Expérience 2		
Lot	Témoin	Spirul.	Témoin	Spirul.	S 10 Pois.
Constituants, p.100 de l'aliment :					
Algues spiruline	-	12	-	12	-
Farine soluble de poisson	-	-	-	-	15
Lait réengraissé à 38 p. 100	53,6	52	59,9	57,8	56,2
Lait écrémé	37,5	17	36,1	16,6	1,7
Maltodextrine	4,9	15	-	9,6	23,1
Complément minéral et vitaminique	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Matière sèche (p. 100) ..	95,34	95,10	94,92	95,44	95,44
Cendres (P. 100)	6,41	6,34	6,59	6,70	5,58
Matières azotées (p. 100)	23,6	23,3	26,8	26,6	25,5
Energie brute (Kcal/kg)	5.137	5.135	5.282	5.300	5.293

* Seve, Aumaître, Tord (1975) - La supplémentation en phosphate bicalcique est portée à 0,74 p. 100 dans le cas du régime spirulines et à 1 p. 100 de bicalcique + 0,3 p. 100 de craie broyée dans le cas du S 10 poisson.

** L'aliment témoin est supplémenté par 0,14 p.100 de DL méthionine, l'aliment spiruline par 0,075 et l'aliment S 10 poisson par 0,25 p. 100.

(*) Février - Seve - C.N.R.Z. - JOUY-en-JOSAS.

Composition et analyse des aliments
Porcelets 2ème âge (*)

Lot	Expériences 1 et 2	
	Témoin et S 10 Poisson	Spiruline
Constituants de l'aliment (%)		
Algues spirulines	-	8
Tourteau de soja 44	20	8,9
Farine de hareng de Norvège	6,0	6,0
Lait écrémé	5,0	5,0
Orge	27,0	27,0
Manioc	29,7	32,8
Sucre	5,0	5,0
Suif	3,0	3,0
Complément minéral et vitaminique	4,0	4,0
Matière sèche	90,2	90,1
Cendres	6,0	6,1
Matières azotées	19,0	19,0
Energie brute (kcal/kg)	3.990	3.990

* Identique pour les deux régimes.

Aliment 1er âge :

Dans chaque cas, le taux de maltodextrine a compensé les variations d'apport d'éléments non azotés ; les taux de protéines ont été stabilisés aux taux de 23,5 % et 26 % pour les 1ère et 2ème expériences.

Aliment 2ème âge :

Le manioc a permis de compenser les taux de matières glucidiques ; les deux aliments ont été stabilisés à 19 % de protéines.

Si les résultats de la première expérience furent troublés par l'existence d'une atteinte de méningo-encéphalite dans le lot témoin ne permettant pas de comparaison statistiquement significative, il est cependant montré que le porcelet tolère bien et ce, dès le jeune âge un apport de 12 % de spirulines dans sa ration. Cependant quelques réserves sont à apporter quant à l'utilisation de ces protéines par le porcelet, le coefficient d'utilisation de l'azote étant assez faible.

La deuxième expérience permet de tirer des conclusions plus sûres.

2) Résultats zootechniques.

Tableau (Février et Seve - CNRZ - JOUY-en-JOSAS)

Croissance et efficacité alimentaire - Valeurs moyennes et écart ty

Régimes	Témoin	Spiruline	Poisson	Ecart type résiduel de $\bar{x}$	Signif. des dif.	
					Entre portées	Entre régimes
Période 12 à 42 jours						
Poids moyen initial (12 j)	3,62 (0,038)	3,63 (0,034)	3,54 (0,093)	0,079	NS	NS
Poids moyen à 42 jours	9,44 (0,250)	9,23 (0,194)	9,28 (0,388)	0,297	NS	NS
Gain moyen quotidien (g/j)	192 (8,6)	185 (6,4)	190 (8,4)	8,5	NS	NS
Aliment consommé (g/j)	243 (5,9)	237 (2,7)	250 (4,3)	4,4	NS	NS
Indice de consommation	1,23 (0,040)	1,28 (0,033)	1,33 (0,057)	0,046	NS	NS
Période 12 à 56 jours						
Poids moyen à 56 jours	14,16 (0,193)	14,00 (0,523)	14,48 (0,453)	0,285	p 0,05	NS
Gain moyen quotidien (g/j)	238 (4,7)	235 (12,0)	248 (7,3)	6,3	NS	NS
Aliment consommé (g/j)	351 (6,7)	350 (9,3)	377 (9,7)	8,9	NS	NS
Indice de consommation	1,47 (0,036)	1,50 (0,044)	1,52 (0,054)	0,029	p 0,05	NS
Jours de diarrhée (%)	5,9	5,9	4,3	-	-	-

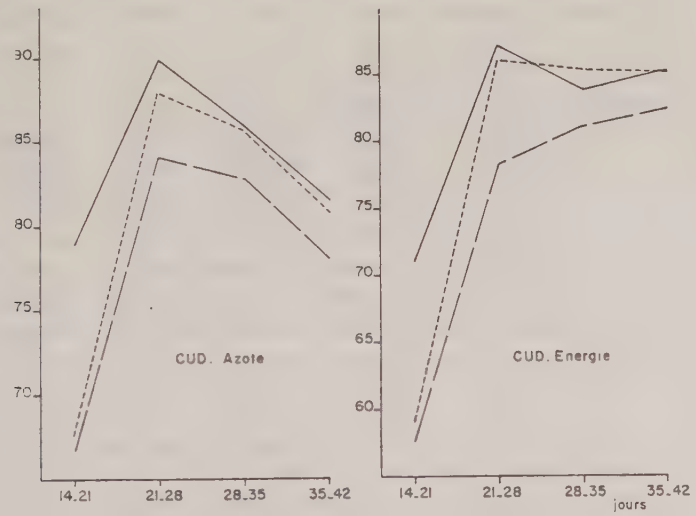
NS : différence non significative.

S'il y a une bonne tolérance des porcelets vis-à-vis des algues spirulines, par contre, il est à noter une augmentation de l'indice de consommation, ces différences d'indices ne sont pas statistiquement significatives ; de même, les performances zootechniques ne sont pas statistiquement altérées par la substitution aux protéines du lait de protéines de poisson ou de spirulines.

3) Résultats concernant la digestibilité.

La digestibilité évolue au cours du temps en fonction de l'âge de l'animal, les divers effets correspondent d'une part à l'adaptation du porcelet à l'aliment 1er âge, d'autre part à l'accroissement de la prise de l'aliment 2ème âge.

Les coefficients d'utilisation digestive (C.U.D.) de la ration à base de spirulines sont significativement plus faibles que ceux observés au niveau des rations témoins. Les écarts les plus importants sont observés au niveau des C.U.D. de l'azote et de l'énergie.



Variation de l'utilisation digestive apparente de la ration en fonction de l'âge du Porcelet

——————— Témoin
..... Poisson
_ _ _ _ _ Spiruline

Porcelets (expérience 2). Utilisation digestive des régimes.

Valeurs moyennes des coefficients d'Utilisation Digestive apparent des régimes et signification statistique.

Constituants et régimes	Périodes					Ecart type résiduel entre coup.	Signification statistique				
							Significat.* des différences		Ecart type résid. intra couples	Signification des différences entre périodes	Interaction période régime
	14-21 jours	21-28 jours	28-35 jours	35-42 jours	12-42 jours ***		Entre port.	Entre régim.			
Matière sèche :											
Témoin	77,4	89,8	87,3	87,0	85,4a					Lp < 0,001	
Spiruline	67,5	86,0	85,1	85,2	90,9b	4,09	NS	p<0,05	4,43	Qp < 0,001	NS
Poisson	68,2	88,9	88,0	87,1	83,1ab					Cp < 0,01	
Matière organique											
Témoin	79,2	90,6	88,2	88,6	86,6a					Lp < 0,001	
Spiruline	69,6	87,0	86,1	86,7	82,3b	3,73	NS	p<0,05	4,14	Qp < 0,001	NS
Poisson	70,6	89,9	89,1	88,6	84,5ab					Cp < 0,01	
Energie :											
Témoin	71,0	87,2	83,8	85,3	81,8a					Lp < 0,001	
Spiruline	57,6	78,3	81,2	82,5	74,9c	5,42	NS	p<0,05	6,5	Qp < 0,001	NS
Poisson	59	86,0	85,3	85,2	78,9b					Cp < 0,01	
Azote :											
Témoin	78,9	89,5	85,9	81,6	84,0a					Lp < 0,001	
Spiruline	66,7	84,1	82,8	78,1	77,9b	4,75	NS	p<0,05	3,83	Qp < 0,001	p < 0,05
Poisson	67,6	87,9	85,7	80,8	80,5ab					Cp < 0,01	

NS = différences non significatives.
L = effet linéaire ; Q = effet quadratique ; C = effet cubique.
Les moyennes affectées du même exposant ne diffèrent pas significativement entre elles, au seuil $p \leq 0,05$ - Tableaux C. FEVRIER et B. SEVE - INRA-CNRZ-JOUY-en-JOSAS.

Porcelets (expérience 2)

Efficacité des éléments digestibles pour la croissance.
Valeur moyenne et écart type.

Critères	Régimes			Signification statistique		
	Témoin	Spirul.	Poisson	Ecart type résiduel de $\bar{x}$	Sign. des diff. Entre portées	Sign. des diff. Entre régimes
14 à 21 jours						
Energie absorbée (Kcal/j)	248 (20,8)	245 (34,8)	217 (27,1)	29,1	NS	NS
Gain de poids (g/1000 kcal dig.)	106 (34,0)	177 (35,9)	195 (35,9)	29,7	$p < 0,05$	$p < 0,15$
Protéines absorbées (g/j)	14,0 (0,98)	12,5 (1,08)	12,5 (0,93)	1,00	NS	NS
Gain de poids (g/g de prot.dig.)	1,88 (0,62)	3,16 (0,55)	3,24 (0,60)	0,47	$p < 0,05$	$p < 0,15$
14 à 42 jours						
Energie absorbée (kcal/j)	955 (21,8)	909 (10,7)	994 (16,7)	14,1	NS	$p < 0,01$
Gain de poids (g/1000 kcal dig.)	201 (4,9)	204 (7,6)	191 (6,9)	6,8	NS	NS
Protéines absorbées (g/j)	47,2 (0,91)	44,6 (0,53)	47,6 (0,62)	0,80	NS	NS
Gain de poids (g/g de prot.dig.)	4,07 (0,11)	4,16 (0,16)	3,99 (0,15)	0,14	NS	NS

En comparant les résultats de la digestibilité avec les performances zootechniques, on peut se demander si les éléments digestibles des algues spirulines ne sont pas plus efficaces que ceux du régime témoin.

Ces données confirment la très bonne adaptation du porcelet à l'utilisation digestive des protéines solubles de poissons après sevrage (SEVE, AUMAITRE, TORD) *. Avec les protéines des algues spirulines, il en va autrement ; ceci en accord avec les travaux portant sur le rat (VERMOREL, TOULLEC, DUMOND, PION)(35), ou concernant les algues Scenedesmus ou Chlorella sur le porc en croissance finition (WITT, SCHRÖDER, MEHDEN)(37) (HINTZ, HEITMAN)* sur le porcelet (MANDEL, TRAVINECK)(24) et sur le rat (KRAUT, JEKAT, PABST)*.

On ne peut répondre par l'affirmative que dans le cas de la première période (même tendance avec le régime poisson). SEVE et LAPLACE *, ont montré que le remplacement partiel du lait de vache par d'autres sources de protéines peut améliorer les conditions de la digestion et peut-être l'absorption chez le jeune porcelet ; aussi l'hypothèse d'une supplémentation bénéfique du lait par des amino-acides, des vitamines ou des oligo-éléments en provenance des algues et du poisson, n'est pas à écarter. Notons que ceci est à rapprocher de certaines données (ASANOV)(1)(OBREZANOV, FROLOVA, LEDIVEVA)*, selon lesquelles, l'utilisation des Chlorella faciliterait le sevrage précoce du porcelet.

III - Alimentation de la truie reproductrice.

1) Caractéristiques des régimes utilisés.

Les femelles furent prises à 75 kg et nourries avec un aliment contenant des spirulines dans la proportion de 5 %, les algues apportent alors environ 20 % de la totalité des protéines en période de croissance et de gestation, 18 % en période de lactation.

Le rationnement dans la période pré-pubertaire fut le suivant :

Poids vif (kg)	75	80	90	100
Quantité d'aliment (Kg/j/animal)	2,60	2,68	2,84	3,00

Celui au cours de la gestation :

Poids vif (kg)	158	200	250
Quantité d'aliment (kg/j/animal)	2,20	2,40	2,70

En lactation, l'aliment fut fourni à volonté jusqu'à concurrence de 4,6 kg par jour et par tête pour les truies ayant moins de 6 porcelets.

---

* D'après FEVRIER C. et SEVE B. (15).

Composition et analyse des aliments pour truies.

Type d'aliment	Jeune reproductrice		Gestation		Lactation	
Lot	Témoin	Spiruline	Témoin	Spiruline	Témoin	Spiruline
Comp. de l'al.(%)						
Orge.....	80	79	70	71	73	72
Tourteau de soja 44 p.100	8	7	6	-	10	9
Farine de hareng 70 p.100	3	-	-	-	3	-
Algues spirul.	-	5	-	5	-	5
Farine de luz désh. 16 p.100 ..	5	5	20	20	10	10
Phosphate bical .	1,39	1,60	1,60	1,56	1,60	1,84
Craie broyée	0,77	0,95	0,88	0,96	0,88	1,08
Sel marin	0,88	0,49	1,00	0,96	1,00	0,56
Mélange oligo-éléments	0,46	0,46	0,52	0,52	0,52	0,52
Mélange vitam....	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Analyse chimique ($\bar{x} \pm t0,05\ sx$)						
Matière sèche M.S. p. 100	87,29±0,97	87,74±3,80	87,91±1,97	87,85±1,74	87,82±2,16	87,81±2,22
Matières minérales M.S. p. 100	7,41±2,01	7,95±1,76	8,23±2,04	8,66± 1,09	7,67±0,60	8,21±1,46
Matières azot.tot. M.S. p. 100	16,13±2,00	16,00±1,75	14,93±1,00	14,80±1,56	17,45±1,94	17,14±2,19
Energie brute Cal/g de M.S.	4280±76	4271±81	4260±54	4252±34	4297±100	4284±109

Oligo-éléments : pour 100 g, $MgCo_3$ 82 ; $FESO_4$, $7H_2O$ 8 ; $ZnSO_47H_2O$ 8 ; $MnSO_4H_2O$ 0,1 ; $CnSO_47H_2O$ 0,05 ; $CoSO_47H_2O$ 0,05 ; IK 0,01.

Vitamines : pour 1000 : Panto.Ca : 2,5 g ; B_2 1 g ; C 1 g ; Nicotinamide 2 g ; B_{12} 2 mg ; choline 50 g ; A (50.000 UI) 20 g ; D (100.000 UI) 2,5g ; DL méthionine.

2) Résultats et discussion.

a) Période prépubertaire.

L'apparition relativement tardive de la puberté peut être due à l'alimentation individuelle, nécessaire au contrôle des consommations. Malgré tout, l'âge au 1er oestrus n'a pas été modifié par l'utilisation des algues dans l'aliment.

Les vitesses de croissance ne sont pas statistiquement différentes de manière significative entre les lots.

	Lot							
	Témoin				Spiruline			
Groupe	1		2		1		2	
Nombre à 75 kg	16		10		16		10	
Nombre au premier oestrus	16		8		13		7	
Conditions au premier oestrus	$\bar{x}$	$s_{\bar{x}}$	$\bar{x}$	$s_{\bar{x}}$	$\bar{x}$	$s_{\bar{x}}$	$\bar{x}$	$s_{\bar{x}}$
Age moyen (1)	232	30	259	30	232	31	265	20
Poids moyen (kg)	108	19	123	17	109	15	122	9
Gain moyen quotidien (g)	570	162	561	40	621	77	547	40
Quantité d'aliment consommée (kg)	165	98	257	77	150	60	252	61
Indice de consommation	5,34	1,86	5,11	0,38	4,42	0,60	5,24	0,39

b) Premier cycle de reproduction.

Seules furent retenues les truies ayant effectué un cycle complet.

Si les résultats font apparaître peu de différences entre les lots, les truies "spirulines" ont produit davantage de porcelets et de ce fait le poids total des portées est significativement plus élevé chez ces dernières que dans les lots témoins.

Mais, en contrepartie de cette production plus nombreuse se trouve un moindre croît des truies "spirulines" (en partie dû au rationnement d'environ 2,35 kg/j/tête).

Truies (cycle 1) | Truies (cycle 2)

Evolution du poids des truies et croissance des porcelets.

Lot	Témoin		Spiruline		Signification statis. valeurs de F.	Témoin		Spiruline		Signification statis. Test F.
Nombre	$\bar{x}$ 17	$s_{\bar{x}}$	$\bar{x}$ 14	$s_{\bar{x}}$		$\bar{x}$ 17	$s_{\bar{x}}$	$\bar{x}$ 14	$s_{\bar{x}}$	
Age à la saillie fécondante (j) ...	243,4	30,5	240,9	32,6	0,05	409	37	418	37	
Poids à la saillie fécondante (kg) ..	111,8	18,8	112,4	14,7	0,01	134	16	132	12	0,21
Gain total de gestation (kg)	52,4	12,1	47,5	9,5	1,43	42,4	8,1	40,9	6,7	0,28
Gain de poids pendant le cycle gestation-lactation (kg)	24,5	13,0	14,4	14,9	3,80	9,6	10,4	12,6	10,6	0,60
Consommation d'alim. :										
Gestation (kg) ...	268,6	12,6	272,1	10,5	0,62	252,4	3,3	253,3	2,9	0,58
Lactation (kg) ...	137,4	16,0	149,6	22,2	2,92	172,4	25,4	158,8	22,8	2,27
Intervalle sevrage-saillie fécondante (j)	19,5	15,0	26,0	18,3	1,91	9,25	6,3	8,07	4,71	0,31
Porcelets										
Résultats moyens par portée										
A la naissance :										
Nbre de porcelets nés vivants	7,53	3,27	9,43	2,80	2,75	9,82	2,81	8,29	2,34	2,49

Truies (cycle 1) | Truies (cycle 2)

Evolution du poids des truies et croissance des porcelets.

Lot	Témoin		Spiruline		Signification statis. valeurs de F.	Témoin		Spiruline		Signifi. cation statis. Test F.
Nbre de porcelets morts nés	0,59	0,91	0,21	0,56	1,69	0,24	0,42	0,29	0,80	0,15
Poids total de la portée (kg)	8,67	3,41	11,71	3,14	6,14	11,49	3,23	11,10	2,15	0,14
Poids moyen d'un porcelet (kg) ...	1,16	0,15	1,26	0,14	3,32	1,18	0,20	1,35	0,20	5,18
A 21 jours :										
Nbre de porcelets	6,71	2,67	7,93	2,89	1,69	8,53	2,35	6,93	2,71	2,89
Poids moyen (kg)	4,77	1,02	4,48	1,03	0,57	5,11	0,52	5,16	0,96	0,03
Pourcentage total de pertes	11		17			13		16		
A 35 jours (sevrage) :										
Nbre de porcelets	6,47	2,68	7,71	2,84	1,79	8,24	2,26	6,93	2,71	2,00
Poids moyen (kg) .	7,75	1,98	7,05	2,01	0,89	7,92	1,31	8,13	1,81	0,12
Pourcentage total de pertes	14		10			16		16		
A 56 jours :										
Nbre de porcelets	5,94	2,62	7,36	2,84	2,28	8,06	2,36	6,57	2,50	3,28
Poids moyen (kg) .	13,29	2,76	13,93	3,92	0,97	13,55	3,01	13,98	3,53	0,01
Pourcentage total de pertes	21		22			18		21		

F1 : 29 - p : 0,10 = 2,89 - p : 0,05 = 4,18 - p 0,01 = 7,60.

Durant la lactation, la consommation d'aliment n'a été supérieure que de 340 g/j par rapport aux témoins et la perte de poids de 15,6 kg contre 14,9 kg.

La production de lait n'a pu être notablement supérieure et répondre correctement au nombre plus élevé de porcelets ; leur croissance fut donc moins rapide que dans le lot témoin.

c) Deuxième cycle de reproduction.

Au cours de ce second cycle, les truies du lot témoin ont fourni un nombre supérieur de porcelets par rapport aux truies "spiruline" de manière non significative cette fois. Cependant, les porcelets des truies du lot témoin sont significativement plus légers que ceux de l'autre lot.

Cet avantage ne se maintient pas au cours de la lactation car à 35 j. les porcelets ont un poids équivalent. Ceci semble dû à une lactation moindre de la part des truies "spiruline". En effet, elles ont consommé moins d'aliment et leur perte de poids, s'est limitée à 14,3 kg contre 17,3 kg pour les truies témoins. Cependant, ces différences ne sont pas statistiquement significatives.

d) Discussion.

Pour l'ensemble des deux cycles de reproduction, s'il apparait que globalement les résultats concernant les truies "spirulines" sont légèrement inférieurs à ceux des lots témoins, ces différences ne sont jamais statistiquement significatives.

Par ailleurs, si les porcelets des truies "spirulines" ont eu une croissance plus lente que ceux des porcelets issus des truies témoins, notamment au ler cycle, ceci est bien dû à leur nombre plus élevé, et non à une moindre valeur énergétique du lait des mères.

Truies

Teneur en matière grasse du lait.

	Lot							
	Témoin				Spiruline			
Cycle	1		2		1		2	
Nombre de prélèvements	13		18		10		13	
	$\bar{x}$	$s_{\bar{x}}$	$\bar{x}$	$s_{\bar{x}}$	$\bar{x}$	$s_{\bar{x}}$	$\bar{x}$	$s_{\bar{x}}$
Teneur en matière sèche g/100 ml	19,7	2,6	19,2	4,0	18,1	0,4	18,7	2,3
Teneur en matière grasse g/100 ml	7,6	2,4	6,7	3,0	6,3	0,7	6,9	2,0
Matière grasse p.100 de la matière sèche .	37,7	6,3	33,5	7,4	34,9	3,5	36,2	6,1

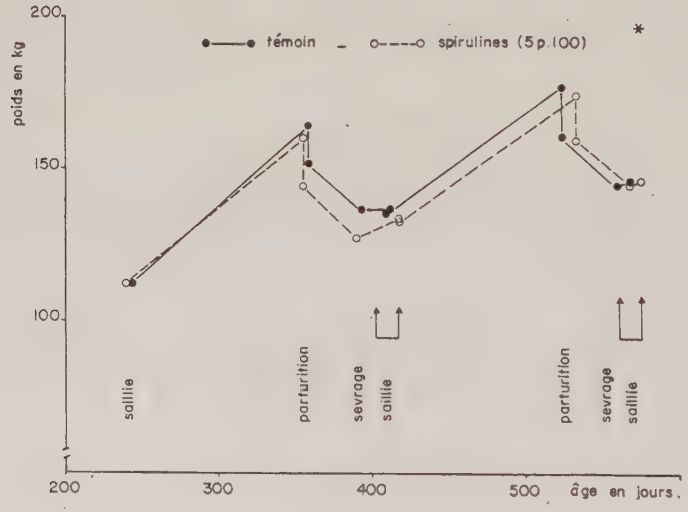
Enfin, en ce qui concerne le nombre de porcelets sevrés par truie et par an, le sevrage ayant lieu à 35 jours, on obtient les résultats suivants :

Lot témoin = 16,34 - Lot "spiruline" = 15,99

Différences non significatives compte tenu des variations individuelles.

L'introduction des algues spirulines dans l'alimentation des porcins dans la proportion de 5 % au niveau de la ration n'a donc influencé ni la croissance des truies ni leur reproductivité.

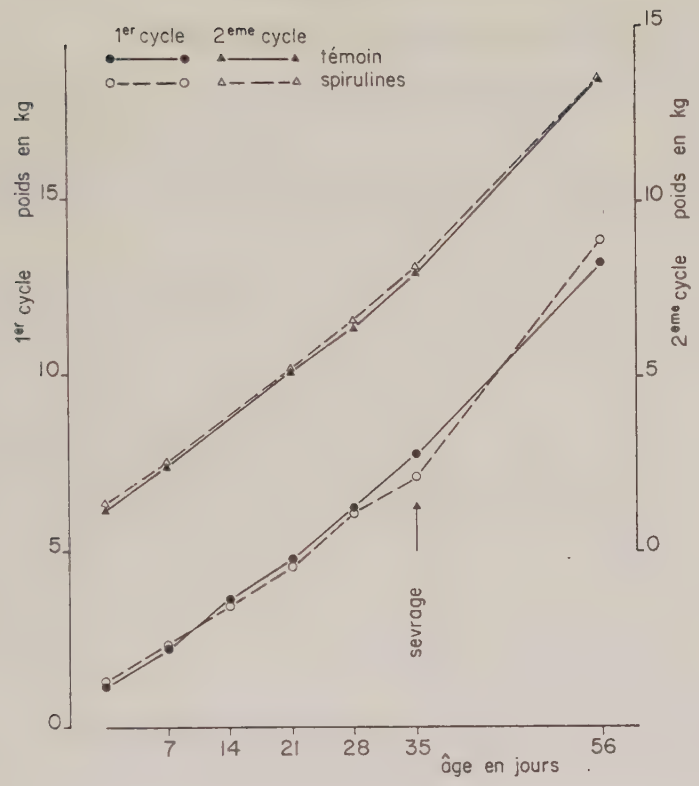
Ceci est à rapprocher des résultats de SOLOV'EVA (32) sur la truie avec Phyllophora (algue riche en minéraux 39 % ; et pauvre en protéines 21 %) introduite à raison de 3,25 % dans l'alimentation des truies et 1 % dans celle des porcelets.



Valeur nutritive des algues spirulines

Evolution du poids des truies au cours des deux cycles de production

* Tableaux : C. FEVRIER et B. SEVE - INRA-CNRZ - JOUY-en-JOSAS.



Valeur nutritive des algues spirulines.

Evolution en fonction de l'âge, du poids moyen des porcelets issus des 1er et 2ème cycles des truies.

Il apparaît que l'algue spiruline peut constituer un complément protéique intéressant dans la plupart des cas. Elle constitue un apport de qualité mais ne peut être considérée comme source de base, dans la mesure où son utilisation digestive reste faible.

B - DANS LES ALIMENTS DES POULES PONDEUSES (9).-

I - Caractéristiques des régimes utilisés.

Au départ, 144 poules furent alimentées de l'âge de 20 à 32 semaines par un même aliment complet, l'aliment témoin.

A partir de la 32ème semaine (quand la ponte est maximale), trois lots de 48 poules sont constitués ; chacun dispose d'un régime à volonté différant par sa teneur en algues soit :

0 % (témoins) - 7,5 % ou 15 %.

L'introduction des algues est effectuée de telle sorte que les caractéristiques analytiques ne soient pas modifiées.

BLUM et COLL·I N.R.A. TOURS	Régime témoin	Régimes avec algues	
		7,5 p. 100	15 p. 100
Matières premières			
Avoine	19,5	19,5	19,5
Orge	32	32	32
Blé	14,7	14,7	14,7
Tourteau de soja 50	4	3	2
Tourteau d'arachide	10,5	5,25	0
Algues spirulines	0	7,5	15
Farine de poisson (Norvège)	2	1	0
Farine de viande	2	1	0
Huile d'arachide	4,5	4,25	4
Calciparine	8,15	9,1	10,05
Phosphate bicalcique	0,7	0,75	0,8
DL méthionine	0,105	0,078	0,050
Lysine	0	0,01	0,02
Sel iodé	0,4	0,4	0,4
Mélange minéral	0,2	0,2	0,2
Mélange vitaminique	1,25	1,25	1,25

	Régime témoin	Régimes avec algues	
		7,5 p. 100	15 p. 100
Caractéristiques (calculées)			
Energie métabolisable (kcal/kg) ..	2.750	2.700	2.650
MAT (N x 6,25 en p. 100)	16,4	16,4	16,4
Lysine (p. 100)	0,72	0,72	0,72
Acides aminés soufrés (p. 100) ...	0,67	0,67	0,67
Calcium (p. 100)	3,05	3,23	3,41
Phosphore disponible (p. 100)	0,39	0,39	0,39

Composition du mélange minéral (en g par 100 kg de régime) : MnO = 14 ; ZnO = 10, $FeSO_4$ = 14 ; $CuSO_4$ = 1,1 ; $CoCO_3$ = 0,06 ; $CaCO_3$ = 161.

Composition du mélange vitaminique (par 100 kg de régime) : vit. A = 800.000 UI ; vit. D_3 = 100.000 UI ; vit. E = 1 g ; B.H.T. = 12,5 g ; riboflavine = 0,4 g ; pantothénate de calcium = 0,2 g ; vit. B_{12} = 1 mg ; chlorure de choline = 50 g ; avoine broyée = q s pour 1.250 g.

Energie métabolisable des algues supposée égale à 2.500 kcal/kg.

Les mesures du nombre d'oeufs pondus et de la consommation alimentaire furent déterminées pour chaque poule par périodes de 28 j. à partir du début de l'expérience.

II - Résultats et discussion.

Les performances de pontes diffèrent peu d'un lot à l'autre et restent très élevées ; cependant, sur l'ensemble des périodes de ponte, le lot soumis à un régime comportant 7,5 % d'algues a une production significativement plus importante par rapport au lot témoin ($p \leqslant 0,01$). Un apport plus élevé de spirulines (15 %) ramène la production au même niveau que le lot témoin.

Influence de la teneur du régime en algues spirulines sur les performances de ponte.

Algues (p. 100) dans le régime	Taux de ponte (en p. 100)			Poids moyen de l'oeuf (en g.)			Poids d'oeuf exporté (en g./poule/jour)		
	0	7,5	15	0	7,5	15	0	7,5	15
Période :									
1	83	85	80	58,0	57,9	56,1	47,8	49,6	47,4
2	80 a	82 a	75 b	58,2ab	59,0 a	56,6 b	46,8ab	48,2 a	44,7 b
3	77	79	77	60,0	60,1	58,3	46,2	47,4	45,1
4	73	74	73	61,1	61,1	59,1	44,9	46,4	45,4
5	72	74	75	62,3	61,5	60,3	44,5	46,2	44,7
6	67	70	72	62,7	62,4	60,5	41,7	44,6	43,9
Moyenne	75,1ab	77,3b	75,0a	60,5a	60,4a	58,5b	45,3a	47,1b	45,2a

Pour chaque critère, les résultats qui ne sont pas suivis de la même lettre diffèr significativement entre eux ($p \leqslant 0,05$). L'absence de lettre indique qu'aucune différence entre lots n'est significative.

La quantité d'aliment consommé augmente quand le régime contient des algues. Cette augmentation est liée à un accroissement de l'indice de consommation et à une diminution du gain de poids vif. Notons que tous ces effets sont à relier avec une baisse de l'apport d'énergie métabolisable provoquée par l'apport d'algues.

Ces constatations vont cependant à l'encontre des observations de BURLAGU, BARASCHIV, SALAGEANU, BALTAC, IONILA (7), montrant que l'efficacité énergétique de Chlamydomonas reinhardi est élevée chez la poule.

Consommation alimentaire, indice de consommation et variation du poids vif.

	Consommation alimentaire (g/poule)			Indice de consommation (g d'aliment/g d'oeuf exporté)			Variation de poids vif (g/poule)		
oids vif initial (g à 20 emaines)							1409	1371	1417
lgues (p. 100) ans le régime	0	7,5	15	0	7,5	15	0	7,5	15
ériodes :									
.....	107 a	117 b	116 b	2,42 a	2,39 a	2,46 a			
.....	127 a	138 b	136 b	2,75 a	2,88 a	3,05 b			
.....	116 a	128 b	127 b	2,55 a	2,76 b	2,83 b			
.....	113 a	123 b	127 c	2,55 a	2,69ab	2,83 b			
.....	110 a	121 b	120 b	2,50 a	2,65ab	2,72 b			
.....	109 a	122 b	122 b	2,66 a	2,77 a	2,80 a	+ 270 a	+ 182 b	+ 146 b
oyenne	114 a	125 b	125 b	2,57 a	2,69ab	2,78 b			

Pour chaque critère et à chaque période, les valeurs qui ne sont pas suivies de la même lettre diffèrent significativement entre elles ($P \leqslant 0,05$).

Tableaux : BLUM et COLL - I.N.R.A. TOURS

En ce qui concerne l'influence des régimes sur les caractéristiques de l'oeuf, on note une diminution du poids moyen avec un régime comprenant 15 % de spirulines ; cette régression est due essentiellement à une réduction de l'albumen.

Difficile à expliquer, cette modification est peut-être due à une influence des minéraux de l'algue, compte tenu de leur rôle durant la formation de l'albumen (SAUVEUR).

La solidité de la coquille dépend largement de la richesse en calcium du régime, d'où l'augmentation significative dans le cas du lot ingérant 15 % de spirulines.

L'influence des algues est remarquable au niveau de la coloration des jaunes, avec un effet si prononcé qu'elle dépasse l'échelle Roche (limitée à 15). Ceci est dû à l'apport de xanthophylle et de carotène par les nouveaux régimes. Un apport supérieur d'algues (15 %) ne modifie pas le résultat, phénomène habituel dans le cas d'accumulation de xanthophylles.

Poids et qualité des constituants de l'oeuf au cours de la 2ème période de ponte.

Algues (en p. 100 dans le régime)	0	7,5	15
Poids total de l'oeuf (g)	58,2 ab	59,0 a	56,6 b
Poids du vitellus (g)	15,7 a	15,9 a	15,4 a
Poids de l'albumen (g)	37,4 a	37,8 a	35,9 b
Index de coquille (poids en g/dm^2)	7,24 a	7,46 ab	7,53 b
Coloration du vitellus (n° dans l'échelle de Roche)	2 a	15 + b	15 + b

Pour chaque critère, les valeurs qui ne sont pas suivies de la même lettre diffèrent significativement entre elles ($P \leqslant 0,05$).

L'incorporation d'algues spirulines dans l'alimentation des poules pondeuses présente deux intérêts ; d'une part elles remplacent sans problème jusqu'à 7,5 % les protéines traditionnelles ; d'autre part, elles permettent la production d'oeufs à jaune bien coloré. En pratique, il semble qu'un apport de 1 à 2 % de spirulines suffise à obtenir une coloration suffisante.

Si cet apport réduit suffit à améliorer la production d'oeufs, l'intérêt d'une telle supplémentation est alors évidente.

C - DANS L'ALIMENTATION DES POULETS DE CHAIR (5).-

La composition des algues Spirulines étant fournie par ailleurs, il est seulement donné une comparaison entre farine de poisson (harengs) et farine d'algues spirulines.

Si ces algues bleues contiennent presque autant de protéines que le poisson, par contre, elles disposent de moins

de lysine et de davantage de matières minérales (sodium et potassium), avec des écarts importants pour ces dernières selon les échantillons.

Compositions comparées de farines d'algues spirulines de poisson (hareng).

Expérience correspondante Procédé de séchage	Farines d'algues spirulines				Farine de poisson
	1 et 4 soleil	2 atomis.	3 rouleaux	5 atomis.	
Composition (p. 100)					
Matières sèches	91	92	92		92
Cendres	10,7	8,1	8,4	7	11
Na	1,8	1,5			0,4
K	1,7	1,7			0,8
Ca	0,1	0,1			2,5
CI		0,4			0,2
M.A.T. (N x 6,25)	65	58	54	52	72
Lysine	4,8	4,3	3,9		5,4
Méthionine	2,0	2,1	1,8		2,0
Cystine	1,0	1,0	0,7		0,7
Matières grasses	0,9				8,5

Les résultats expérimentaux sont regroupés en trois parties :

- performances obtenues avec les spirulines utilisées comme source de protéines dans les régimes complets.
- mesures d'efficacités protidique et énergétique.
- influence d'un complexe enzymatique (amyloglucosidase) susceptible d'améliorer l'utilisation des glucides de l'algue.

I - Utilisation des spirulines comme source de protéines dans les régimes complets.

Deux essais furent réalisés :

Composition en p. 100 des régimes de l'expérience 1 *

	Témoin	Spirulines 5 p. 100	Poisson 4 p.100	Spirulines 30 p. 100	Poisson 24 p.100
I. Matières premières					
Maïs	64,2	61,0	61,0	27,2	27,2
Tourteau de soja 50	22,2	16,2	16,2	7,2	7,2
Tourteau de tournesol	8,5	8,1	8,1	3,6	3,6
Farine de luzerne .	1,1	1,1	1,1	0,5	0,5
Farine de poisson .			4,0		24,0
Algues spirulines .		5,0		30,0	
Saccharose		4,4	5,5	27,6	34,5
Phosph.bicalcique	1,0	1,0	0,9	1,9	1,3
Carbonate de calcium	1,8	2,0	1,9	1,9	1,3
Sel iodé	0,4	0,4	0,5		0,5
Complément d'oligo-constituant	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
II. Composition analytique					
Energie mét.(kcal/kg)	2.838	2.903	2.920	3.087	3.220
M.A.T. (N x 6,25) (p. 100)	20,0	19,9	19,8	26,2	25,9
Lysine (p. 100) ...	1,0	1,0	1,0	1,7	1,6
Acides aminés soufrés (p. 100)	0,8	0,8	0,8	1,3	1,0
Phosphore total (p. 100)	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7
Mat.minérales	6,3	6,4	5,9	6,7	6,3
(p. 100) dont Ca ..	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1
Na ..	0,3	0,4	0,3	0,5	0,4
K ..	0,8	0,7	0,7	0,8	0,6

Ce complément apporte pour 100 kg d'aliment : vit. A = 800.000 UI ; vit. D = 200.000 UI ; riboflavine = 0,4 g : pantothénate de Ca = 0,5 g ; niacine = 1 g ; vit. B_{12} = 0,2 mg ; tocophérol = 1 g ; B.H.T. = 12 g ; Chlor. de choline = 90 g ; DL méthionine = 100 g ; MnO = 20 g ; Zn = 15 g ; $FeSO_4$ = 20 g ; $CuSO_4$ = 1,5 g ; $CoCO_3$ = 0,10 g ; KI = 0,3 g.

Composition des régimes (en p. 100) utilisés dans l'expérience 2

Régimes	Période de démarrage (0à4 sem.)								Période de finition (4 à 8 semaines)							
	T	3	6	9	12	15	P	S	T	3	6	9	12	15	P	S
Maïs	65	65	65	65	65	65	65	61	62	62	62	62	62	62	66	62
Amidon	0	0	0	0	0	0	3,3	0	0	0	0	0	0	0	2	0
Algues spirulines	0	3	6	9	12	15	0	0	0	3	6	9	12	15	0	0
Tourteau de soja 50	20,0	18,95	17,9	16,8	15,8	14,7	15	31	20	18,95	17,9	16,8	15,8	14,7	16	26
Tourteau d'arachide	3,5	2,8	2,1	1,4	0,7	0	0	0	3,5	2,8	2,1	1,4	0,7	0	0	0
Farine de poisson	1,85	1,5	1,1	0,75	0,35	0	11,7	0	1,85	1,5	1,1	0,75	0,35	0	6	0
Gluten de maïs	3,8	3,0	2,3	1,5	0,75	0	0	0	3,8	3,0	2,3	1,5	0,75	0	2	2
Huile d'arachide	0,75	0,6	0,45	0,3	0,15	0	0	2,35	3,75	3,6	3,45	3,3	3,15	3,0	3	4,45
Phosphate bicalcique	1,6	1,6	1,55	1,55	1,50	1,5	1,5	2,0	1,6	1,6	1,55	1,55	1,5	1,5	1,5	2,0
Calcimatine	1,5	1,55	1,6	1,7	1,75	1,8	1,5	1,5	1,5	1,55	1,6	1,7	1,75	1,8	1,5	1,5
Sel iodé	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Mélange oligo-éléments	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
Mélange vitaminique	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
DL méthionine	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Caractéristiques analytiques																
Energie métabol. (kcal/kg)			3 050				3 040	3 020			3 210				3 210	3 200
MAT (p. 100)			20,9				20,9	20,6			20,6				19,1	19,1
Lysine (p. 100)			1,00				1,28	1,15			1,00				1,02	1,01
Acides amin. soufrés (p. 100)			0,80				1,00	0,88			0,75				0,75	0,76
P. disponible (p. 100)			0,45				0,66	0,48			0,45				0,52	0,48
Ca (p. 100)			1,00				1,33	1,11			1,00				1,16	1,02

Composition du mélange d'oligoéléments (en g/100 kg de régime) : MnO = 35 ; ZnO = 25 ; $FeSO_4$ = 35 ; $CuSO_4$ = 2,7 ; $CoCO_3$ = 0,1 ; ki = 0,5 ; $CaCO_3$ = 362.

Composition du mélange vitaminique (par 100 kg de régime) : vit. A = 1 200 000 UI ; vit. D_3 = 120 000 UI ; tocophérol = 0,9 g ; B.H.T. = 12,5 g ; ménadione bisulfite = 0,3 g ; riboflavine = 0,5 g ; nicotinamide = 1,2 g ; pantothénate de Ca = 0,6 g ; cyanocobalamine = 0,25 mg ; chlorure de choline = 100 g ; avoine q.s. pour 1 000 g.

Dans cet essai, l'énergie métabilisable des algues spirulines a été supposée égale à celle de la farine de poisson soit 3 100 kcal/kg

- à faible dose (5 %) comparaison des farines d'algues et de spirulines dans un régime apportant suffisamment de lysine pour une croissance normale.

- influence de la teneur en algues (0, 3, 6, 9, 12 ou 15 %) en maintenant constante la composition des aliments.

Le premier essai concerne une période courte de 4 à 6 semaines d'âge et un nombre limité de sujets.

Le second, couvre la durée normale d'élevage du poulet de chair (0 à 8 semaines).

1) - Matériel et méthodes.

Expérience 1

Réalisée dans une salle conditionnée, pendant la période pré-expérimentale (4 premières semaines de la vie), les poulets sont progressivement habitués à vivre isolés en cage.

A l'âge de 4 semaines, 35 poulets sont répartis en 7 blocs comprenant 5 poulets ayant un développement pondéral identique et qui vont disposer chacun d'un régime différent.

A la fin de l'expérience d'une durée de deux semaines, il est enregistré gain de poids, consommation d'aliments, quantité d'eau bue durant la seconde semaine d'essai.

Expérience 2

480 poussins sont répartis selon leur poids vif en 5 classes de 96 sujets.

Il est formé 8 lots de 60 comprenant 12 sujets de chacune des cinq classes.

Il est ainsi obtenu 40 groupes de 12 poussins élevés dans une même cage collective.

Deux lots disposant de farine de poisson ou de soja servent à comparer l'efficacité des régimes à 0, 3, 6, 9, 12, 15 % d'algues.

Dans tous les cas, les régimes présentent la même composition analytique notamment en lysine.

Par ailleurs, on suppose que 15 % d'algues et 0,3 % de $CaCO_3$ correspondent à 15 % de protéines de référence (tourteaux de soja et d'arachide, farine de poisson, gluten, huile, phosphates).

Influence comparée des algues spirulines et de la farine de poisson sur le gain de poids et les consommations d'aliment et d'eau du Poulet (expérience 1).

	Age du poulet				
	4 à 8 semaines			5 à 6 semaines	
	Gain de poids (g)	Aliment ingéré (g)	Indice de consommat°	Quantité d'eau bue (g)	Rapport : eau / aliment
Lot témoin	401 a	811	2,06 a	1.323	2,70
Algues 5 p. 100 ...	378 a	761	2,02 a	1.258	2,56
Poisson 4 p. 100 ..	407 a	785	1,85 b	1.314	2,28
Algues 30 p.100 ...	353 b	780	2,25 c	1.800	3,83
Poisson 24 p. 100 .	468 c	769	1,63 d	1.180	2,28
Moyenne des lots "Algues"	365	770	2,14	1.529	3,19
Moyenne des lots "Poisson"	438	777	1,74	1.147	2,28

Les valeurs de chaque colonne qui ne sont pas suivies de la même lettre diffèrent significativement entre elles ($P < 0,05$).

* Tableaux : BLUM et CALET - INRA - CR. TOURS-NOUZILLY.

2) Résultats et discussion.

Expérience 1.

- Les résultats obtenus avec 5 % d'algues assurent des performances analogues à celles obtenues avec le régime témoin. La faible diminution non significative du gain de poids est à relier avec une baisse de l'indice de consommation.

- Les lots à 4 % de poisson ne voient pas leur gain de poids modifié, mais une amélioration de l'indice de consommation ; les régimes à 24 % de poisson permettent des performances bien supérieures, ce qui était prévisible au vu du niveau énergétique de la ration.

- Les 30 % de spirulines par contre, conduisent à un gain de poids moindre (moins 12 %) avec un indice de consommation augmenté. La mesure de la quantité d'eau ingérée montre une consommation plus importante pour ce lot à relier avec des fientes liquides et visqueuses de causes non expliquées.

L'ingestion d'une faible quantité de spirulines ne modifie pas les performances ; la consommation, d'une forte quantité conduit à une intolérance digestive d'où réduction du gain de poids et baisse de l'efficacité des nutriments énergétiques.

Expérience 2.

- La substitution d'algues aux protéines de référence amène un ralentissement de la croissance pondérale pour des teneurs égales ou supérieures à 6 % durant la période de démarrage.
En finition, les différences ne sont statistiquement pas significatives. Mais il est toujours observé en finition comme au démarrage une réduction des gains de poids d'autant plus élevée que l'apport d'algues est important ; la baisse de croît s'accuse nettement lorsque les teneurs en algues passent de 12 à 15 %.

- Les algues spirulines n'assurent une bonne croissance qu'à faible dose (moins de 6 % du régime) ; les apports élevés sont préjudiciables surtout durant les quatre premières semaines de la vie.

Influence de la quantité de spirulines remplaçant dans le régime des sources de protéines équivalentes (Protéine de référence) sur les performances du Poulet de chair *.

Régime	T	3	6	9
p.100 d'algues	0	3	6	9
Démarrage (0 à 4 semaines) :				
Gain de poids (g)	607 a	595 a	555 b	535 bc
Consommation (g)	1132	1126	1076	1104
Indice	1,86 a	1,89 a	1,94 a	2,06 b
Finition (4 à 8 semaines) :				
Gain de poids (g)	1130	1109	1086	1080
Consommation (g)	2751	2694	2587	2685
Indice	2,33	2,38	2,47	2,44

Régime	12	15	P	S
p. 100 d'algues	12	15	0	0
Démarrage (0 à 4 semaines) :				
Gain de poids (g)	510 c	447 d	608 a	601 a
Consommation (g)	1134	1068	1117	1118
Indice	2,22 c	2,29 c	1,84 a	1,86 a
Finition (4 à 8 semaines) :				
Gain de poids (g)	1061	1049	1096	1122
Consommation (g)	2737	2680	2699	2678
Indice	2,53	2,59	2,41	2,37

Les valeurs qui ne sont pas suivies de la même lettre diffèrent significativement entre elles ($P < 0,05$).
L'absence de lettres indique qu'aucune différence n'est significative.

* BLUM-CALET-INRA TOURS-NOUZILLY.

II - Qualité des protéines et valeur énergétique des algues spirulines.

Deux essais sont réalisés :

- dans le premier les spirulines sont ajoutées en quantités variables dans un régime sans azote ; constituant la seule source d'acides aminés, il est déterminé leur aptitude à assurer la croissance par rapport à une protéine de référence.
- dans l'autre cas, les spirulines (5 ou 10 % du régime) sont mélangées à d'autres sources de protéines, leur utilisation est recherchée par la méthode des bilans.
- expérience 3.

1) Matériel et méthode.

Les sujets dans un local conditionné, sont progressivement adaptés à une vie individuelle durant leur première semaine de vie.

A 8 jours, ils sont répartis en 10 classes en fonction de leur poids ; il est formé 10 groupes de 20 en prélevant deux poulets dans chaque classe. Un groupe est sacrifié afin de déterminer la composition de départ.

Composition (en P. 100) des mélanges utilisés dans l'expérience 3 pour la formulation de 9 régimes expérimentaux :
O (mélange O non modifié) ; A_5, A_{10}, A_{20} et A_{30} (5, 10, 20 ou 30 p. 100 de A dans O) ; R_5, R_{10}, R_{20} et R_{30} (5, 10, 20 ou 30 p. 100 de R dans O).

	Mélange O (sans azote)	Mélange A (algues)	Mélange R (protéine de référence)
Matières premières			
Amidon	35,8		
Glucose monohydraté	50,0		
Farine de spirulines		97,7	
Farine de poisson			12,3
Gluten de maïs			25,4
Tourteau de soja 50			32,9
Tourteau d'arachide			23,5
Cellulose	2,0		
Huile d'arachide	5,0		5,1
Carbonate de calcium	1,5	2,3	
Phosphate bicalcique	1,7		0,8
Mélange minéral	2,0		
Mélange vitaminique	2,0		
Caractéristiques analytiques (calculées)			
MAT (p. 100)		52,5	52,5
Lysine (p. 100)		2,37	2,38
Acides aminés soufrés		1,80	1,79

Composition du mélange minéral (en g pour 100 kg de régime) : K_2HPO_4 = 730 ; NaCl = 500 ; $MgSO_4$, 7 H_2O = 500 ; $MnSO_4$, H_2O = 33 ; $ZnCl_2$ = 8 ; Na_2SiO_3 = 5,5 ; KI = 4 ; NaBr = 2,4 ; $CuSO_4$, 5 H_2O = 2 ; $NaMoO_4$ = 0,9 ; H_3BO_3 = 0,9 ; $CoSO_4$, 7 H_2O = 0,25 ; Na_2SeO_3 = 0,05 citrate ferrique = 33 ; alun de K = 1 ; carbonate de Ca = 179.

Composition du mélange vitaminique (pour 100 kg de régime) : vit. A = 1.600.000 UI ; vit. D_3 = 200.000 UI ; tocophérol = 10 g ; vit. K_3 = 1 g ; thiamine = 1 g ; riboflavine = 3 g ; pyridoxine = 3 g ; pantothénate de Ca = 10 g ; ac. nicotinique = 20 g ; ac folique = 0,6 g ; biotine = 0,1 g ; chlorure de choline = 350 g ; acide ascorbique = 50 g ; ac. paraaminobenzoïque = 50 g ; inositol = 50 g ;

Trois mélanges sont réalisés :

Un régime sans azote
Deux sources de protéines comparables
- l'une formée à 97,7 % d'algues (A)
- l'autre constituée de matières traditionnelles et servant de protéines de référence (R)

Neuf régimes sont créés :

. régime 0 sans protéines

. régime A_5 A_{10} A_{20} A_{30} avec 5, 10, 20, 30 % de A

. régime R_5 R_{10} R_{20} R_{30} avec 5, 10, 20, 30 % de R

Chaque régime est attribué à un lot différent.

Expérience 4.

Six animaux des lots témoins, algues 5 % et 30 % de l'expérience I sont conservés ; les mêmes régimes sont utilisés et il est mesuré l'énergie métabolisable et la rétention azotée par la méthode des bilans.

2) Résultats.

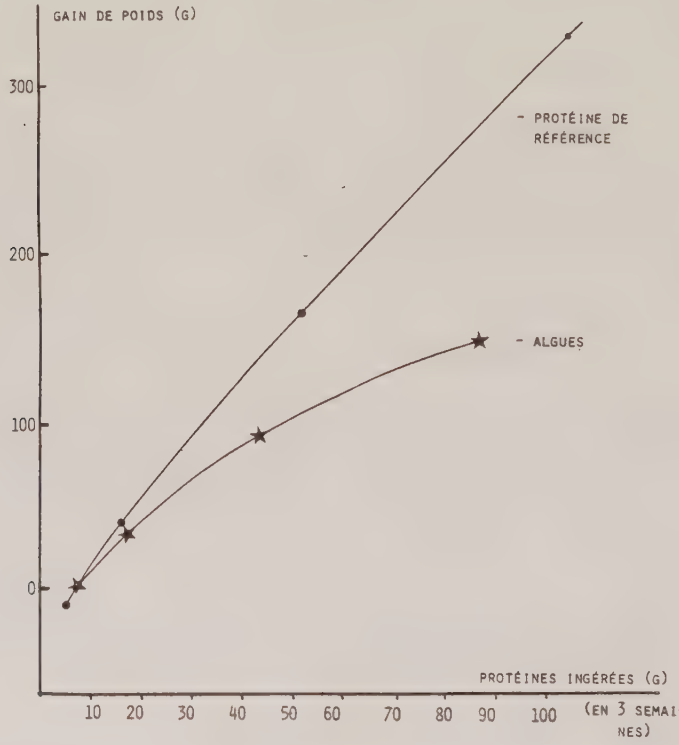
Expérience 3.

L'efficacité des protéines d'algues mesurée par leur aptitude à assurer l'entretien et le développement pondéral apparaît comparable à celle de la protéine de référence pour une concentration correspondant à 10 % de spirulines. Au delà, l'efficacité diminue, semblant montrer ainsi l'existence de facteurs antinutritionnels.

Influence de l'origine des protéines (algues A ou référence R) et de leur teneur dans le régime sur la consommation et le développement pondéral des poulets entre 1 et 3 semaines d'âge (expérience 3).

Régime	0	A 5	R 5	A 10
p. 100	0	2,6	2,6	5,2
Concommation (g)	158	258	221	319
Protéines ingérées (g).....	0	6,7	5,8	16,7
Variation du poids vif (g) .	- 26	+ 2	- 2	- 36

Régime	R 10	A 20	R 20	A 30	R 30
p. 100 de protéines	5,2	10,5	10,5	15,7	15,7
Consommation (g)	310	404	493	481	676
Protéines ingérées (g)	16,3	42,4	51,8	75,8	106,5
Variation du poids vif (g) .	+ 44	+ 94	+ 165	+ 146	+ 328



Régime sans azote additionné de spirulines ou d'une protéine de référence (mélange de même composition que les spirulines).

Du point de vue énergétique, en moyenne, les algues ont une efficacité de 23 % inférieure à celle de la protéine de référence, pour des apports d'algues relativement élevés (20 et 30 %).

Valeur de l'énergie métabolisable et efficacité des protéines selon le mélange (algues ou référence) incorporé au régime sans azote (expérience 3).

	Mélange d'algues		Mélange de référence	
	20 p. 100 (A 20)	30 p. 100 (A 30)	20 p. 100 (R 20)	30 p.100 (R 30)
Energie métabolisable (E ingérée - E excrétée) et Kcal/kg d'aliment	3078 a	2997 a	3339 b	3368 b
CUP = $\frac{\text{N retenu}}{\text{N ingéré}}$ x 100 déterminé				
par bilan	37 a	42 a	57 b	58 b
par analyse corporelle	43 ab	38 b	53 a	48 ab
VNP = 100 x $\frac{\text{N corporel (lot exp. - lot sans N)}}{\text{N ingéré}}$	48 ab	42 b	57 c	51 ac

CUP = Coefficient d'Utilisation Protéique - VNP = Valeur Nette des Protéines

Les algues constituent une source d'acides aminés très disponibles à faible dose, moins bien utilisée pour des valeurs atteignant plus de 20 %.

Cette variation de la valeur alimentaire est examinée dans le cas des régimes complets de l'expérience 4.

Expérience 4.

Résultats obtenus :

Influence de la teneur du régime en algues spirulines sur la valeur de l'énergie métabolisable et sur l'efficacité des protéines (expérience 4).

Régime	Témoin	5 p. 100 de spirulines	30 p. 100 de spirulines
Energie métabolisable (kcal/kg) :			
Mesurée	2823 a	2908 b	2810 a
Calculée	2839	2877	2933
CUP = $\frac{\text{Protéines retenues}}{\text{Protéines ingérées}}$ x 100	41 a	50 b	38 a

Les résultats suivis d'une même lettre ne sont pas significativement différents ($P < 0,05$).

Calculs établis à partir des données fournies par les tables, sauf pour les spirulines qui sont supposées contenir 2487 kcal EM/kg (expérience 3).

Le coefficient d'utilisation desprotéines est significativement augmenté par les 5 % de spirulines ; la diminution non significative notée avec les 30 % d'algues était prévisible compte tenu de la forte teneur en protéines du régime.

3) Conclusion.

En définitive, s'il existe une influence de la concentration en algues, la diminution de l'efficacité des protéines n'est sensible qu'avec des régimes apportant une quantité insuffisante ou marginale d'acides aminés. Les baisses de performances liées à un apport important d'algues ne sont pas dues à une mauvaise qualité des protéines ; elles semblent davantage liées à une mauvaise utilisation de certains constituants énergétiques, sans doute certains glucides peu digestibles.

III - Essais de valorisation des algues par addition d'amyloglucosidase.

Le but de l'expérimentation est de provoquer une augmentation des performances par une lyse enzymatique des sucres.

L'amyloglucosidase s'étant révélée capable in vitro d'hydrolyser une partie des glucides des spirulines, elle fut ajoutée au régime à base d'algues fourni au poulet de chair.

Expérience :

96 poulets de 5 jours sont répartis en 8 classes en fonction de leur poids, en prélevant 2 poulets dans chaque classe, il est fourmé 6 lots de 16 poulets.

Chaque lot dispose d'un régime différent durant 12 jours.

L'aliment A avec algues est semblable au régime témoin, complet et équilibré ; additionné d'amyloglucosidase à raison de 0,17 ; 0,7 ; 2,8 et 11,4 % du complexe enzymatique, il fournit les régimes B, C, D et E.

Composition (en p. 100) des régimes utilisés au cours de l'expérience *.

	Témoin T	Algues A_1
I. Matières premières		
Maïs	64	64
Tourteau de soja 50	20,3	15,7
Algues spirulines	0	13
Farine de poisson	3,6	2
Gluten de maïs	3,3	0
Tourteau d'arachide	3,0	0
Huile d'arachide	0,7	0
Calciparine	1,5	1,8
Phosphate bicalcique	1,6	1,5
Sel iodé	0,5	0,5
Mélange d'oligoéléments	0,5	0,5
Mélange de vitamines et aminoacides	1,0	1,0
II. Caractéristiques analytiques		
Energie métabolisable en kcal/kg	3028	2923
MAT en p. 100	21,6	21,6
Lysine en p. 100	1,15	1,15
Acides aminés soufrés en p. 100	0,89	0,89

B, C, D, E = 4 régimes dérivés de A par addition d'amyloglucosidase à raison de 1,7 ; 7 ; 28 et 114 g par kg d'aliment.

Composition du mélange (en g/100 kg de régime) : MnO = 35 ; ZnO = 25 ; $FeSO_4$ = 35 ; $CuSO_4$ = 2,7 ; $CoCO_3$ = 0,1 ; KI = 0,5 ; $CaCO_3$ = q.s. ; pour 500 g.

Composition du mélange (par 100 kg de régime) vit. A = 800.000 UI ; vit. D_3 = 100.000 UI ; vit. K_3 = 0,3 g ; vit. E = 0,75 g ; B.H.T. = 12,5 g ; riboflavine = 0,5 g ; nicotinamide = 1 g ; pantothénate de Ca = 0,5 g ; vit. B_{12} = 0,2 mg ; chlorure de choline = 190 g ; DL méthionine = 100 g ; lysine = 60 g ; avoine q.s. pour 1000 g.

Energie métabolisable des spirulines supposée égale à 2500 kcal/kg.

* BLUM et CALET : INRA - Station de recherches avicoles - 37380 MONNAIE.

Résultats.

Influence de l'amyloglucosidase sur la valeur alimentaire du régime à base d'algue.

Amyloglucosidase (p. 100 du régime)	Régime témoin T 0	Régimes à base d'algues A 0	B 0,17	C 0,7	D 2,8	E 11,4
Performances de croissance de 5 à 17 jours d'age :						
Gain de poids (g) ...	482 a	443 b	435 b	438 b	441 b	382 c
Consommation (g)	716 a	699 a	708 a	711 a	704 a	635 b
Indice de consommation	1,48 a	1,58 b	1,63 bc	1,63 bc	1,60 b	1,67 c

Pour chaque critère les résultats qui ne sont pas suivis de la même lettre diffèrent significativement entre eux ($P \leqslant 0,05$).

Il est noté un retard de croissance lié à une sous-consommation des régimes spirulines et à leur énergie métabolisable inférieure au régime témoin.

Jusqu'à une teneur de 2,8 %, l'amyloglucosidase ne modifie pas les performances ; les mauvais résultats avec le régime à 11,4 % de complexe enzymatique semblent liés et à la dilution des éléments du régime et à l'influence directe du produit.

IV - Conclusion.

Les algues spirulines entraînent un retard de croissance au-delà d'un apport de 6 %, retard lié à une sous-consommation pour les apports modérés et à une mauvaise digestibilité, se traduisant par une baisse d'efficacité des protéines et des nutriments énergétiques, pour les concentrations élevées (20 et 30 %).

La valeur initiale de 2500 kcal d'énergie métabolisable par kilogramme est plus élevée lors d'apport réduit (5 %) et plus faible pour les fortes concentrations (30 %).

L'efficacité des protéines tend à diminuer avec l'augmentation de la teneur en algues, diminution d'efficacité peut-être

liée à une sous-consommation qui entraîne une utilisation des acides aminés à des fins énergétiques.

Il est donc possible d'utiliser des apports réduits (5 %) dans l'alimentation du poulet de chair. Quantité cependant suffisante pour fournir des xanthophylles en forte quantité et assurer une production de qualité.

Notons que selon G. CLEMENT, les échantillons utilisés pour ces expérimentations étaient de mauvaise qualité (séchage trop prolongé ayant entraîné une altération des constituants), ce qui explique les performances médiocres obtenues pour des taux supérieurs à 6 %.

D - DANS L'ALIMENTATION HUMAINE (31).-

Les spirulines sont consommées par les tribus du Kanem au Tchad, en petites quantités ; il appartient donc de savoir :

- si elles sont adaptables au goût français
- quelle est leur valeur nutritionnelle.

I - Acceptabilité.

1) Dans un régime hyper-protéique.

Destinées à des obèses soumis à un régime hyper-protéique, ces recettes : incorporation à des épinards, imitation de boudin, d'escargots, de foie persillé, comportent un apport minimum de glucides et de lipides.

Les trois premières préparations utilisent les spirulines vertes mexicaines MA_7 et la dernière les spirulines décolorées $MA_{10}D_2$.

L'aspect de ces produits est en moyenne bon ou assez bon, mais le goût et surtout l'arrière-goût très mauvais ou mauvais, donnent finalement une impression générale mauvaise. L'acceptabilité est seulement médiocre pour la préparation des "escargots" dans laquelle le goût est masqué par l'ail et pour le "foie" qui contient du beurre, du persil et de l'ail.

Pour les aliments hyperprotéiques, il semble difficile de concurrencer la caséine qui est incolore et insipide.

2) Potages de 1,7 à 3,3 % de spirulines RL_1 et $MA_{10}D_2$.

. Tout d'abord furent testés quatre potages aux légumes : endives, céleri, poireaux, tomates, dont le liant était la pomme de terre.

Si l'acceptabilité est mauvaise pour les endives, médiocre pour le céleri et les poireaux, par contre elle est bonne pour la tomate qui parvient à masquer l'arrière-goût du produit.

. Les spirulines décolorées $MA_{10}D_2$ furent essayées sous forme de potage à 1,7 et 2,3 % avec de la semoule ou des pâtes à potage comme liant.

L'impression générale est de assez bonne (poireaux) à bonne (carottes, haricots verts).

3) Omelettes à 5 et 10 % de spirulines.

Avec les algues lyophilisées vertes, l'acceptabilité est assez bonne.

Avec les algues décolorées $MA_{10}D_2$ l'acceptabilité n'est que médiocre du fait du goût restant de l'acétone.

Les algues décolorées à l'alcool MAD sont mieux tolérées et ce même à une concentration de 10 %, leur légère couleur verte ne gêne pas et l'impression générale est bonne.

4) Dessert à 5 et 10 % de spirulines vertes et décolorées.

. Biscuits chocolatés mexicains à 10 % de spirulines MA_7. L'acceptabilité générale est assez bonne malgré un léger arrière-goût de spirulines.

. Flans au caramel à 10 % de spirulines décolorées, crème à 5 et 10 %. Ils sont mal ou peu acceptés quel que soit le mode de décoloration employé.

5) L'hydrolysat de spirulines.

Liquide brun noir fortement salé n'a plus ni odeur ni goût d'algue ; très proche du "viandox", il est très bien accepté et sert même à donner du goût à des protéines texturées neutres.

6) Conclusion.

La spiruline est peu appréciée des palais français surtout à forte dose, à cause de la couleur, de l'odeur et du goût.

La couleur intense de certains échantillons gêne l'acceptabilité de la plupart des préparations. Les spirulines lyophylisées sont mieux tolérées que celles séchées par atomisation, qui ont une odeur et un goût plus prononcés.

Les spirulines décolorées permettent la préparation de formes culinaires de meilleur aspect, donc mieux acceptées. La décoloration à l'alcool (MAD) est préférable à celle qui utilise l'acétone dont l'odeur et le goût persistent ($MA_{10}D_2$). Les spirulines décolorées à l'alcool (MAD) restent légèrement vertes mais sont finalement les mieux acceptées. Certains aromates sont préférables : tomate, chocolat. L'hydrolysat de spirulines sans odeur ni goût d'algue est parfaitement toléré.

Les motivations psychologiques et les habitudes alimentaires interviennent très largement dans l'acceptatilité. Ainsi, au Tchad, c'est le goût de spiruline qui est recherché pour donner un arôme au millet, et, au Mexique, ces algues aliment ancestral utilisé par les Aztèques, sont considérées comme donnant de la force.

II - Valeur nutritionnelle.

Les mesures furent effectuées sur 5 bilans chez les sujets dénutris en réalimentation.

Les spirulines furent administrées en continu par sonde environ 16 heures sur 24, durant 4 à 6 jours à des doses journalières de 20, 50 ou 100 g de protéines correspondant à 15 %, 30 et 50 % de la ration protéique.

Les calories protéiques constituent alors respectivement 14, 18 et 20 % des calories totales ingérées.

Des périodes témoins de 4 et 6 jours sont réalisées avant et après en utilisant un mélange isoprotéique et isocalorique.

Les bilans d'azote, assez différents d'un sujet à l'autre (+ 1.1 à + 12.5 g) restent toujours positifs pendant les trois périodes, même chez le quatrième sujet qui ne prend pas de poids. Dans tous les cas, l'azote fécal s'élève durant l'administration de spirulines.

On n'observe pas de trouble gastro-intestinal.

Bilan d'azote

Malade	Période Nbre de jours	Poids(kg) en fin de pér.	Protides ingérés (g)		Bilan N (g)	Acide urique		
			Spirul. (prov.)	Tot. (g)		N féc. (g)	Sér. (mg/l)	Urinaire
Mme K... 25 ans	Pré.(4)	40,900		140	5,5	1,27		
	Spir.(4)	42,700	20 (MA_7)	140	4,6	1,62		
	Post.(4)	42,700		106	3,2	1,15		
Mme B... 22 ans	Pré.(4)	28,300		144	13,6	1,9		
	Spir.(6)	30,750	50 (IFP)	162,5	12,5	2,46		
	Post.(4)	32,750	RL	181	13,4	1,87		
Mme R... 26 ans	Pré.(4)	33,350		140	8,5	1,32	45	711
	Spir.(4)	34,950	50 (décol.)	130	6,7	2,20	54	
	Post.(3)	33,300	$MA_{10}D_2$	140	9,4	1,73	50	1050
Mme N... 39 ans	Pré.(5)	41,000		103,5	2,2	0,8	56	897
	Spir.(5)	40,400	45 (décol.)	95	1,1	1,76		
	Post.(4)	40,400	$MA_{10}D_2$	82	1,5	1,1	65	750
M. W... 34 ans	Pré.(5)	55,900		176	9,6	1,44	60	1050
	Spir.(4)	57,200	100 (décol.)	190	9,8	2,33	69	1673
	Post.(1)	57,550	$MA_{10}D_2$	195	8,6	(5,8)	54	315

La vitesse de transit intestinal n'est pas modifiée par les algues comme nous le confirme l'expérience pratiquée chez un malade nourri par jéjunostomie. Une solution contenant 1 g de spirulines lyophilisées RL, introduite au niveau de la jéjunostomie, colore les selles 5 heures après, alors qu'une suspension de carmin la colore 6 heures après, ce qui n'est pas significativement différent.

Le calcul statistique sur les mesures de 59 jours ne montre aucune différence de l'azote et des bilans durant la période spirulines par rapport aux périodes témoins. Seul l'azote fécal augmente très significativement durant l'administration de spirulines : 2,08 g au lieu de 1,33 et 1,51 g.

Les coefficients CUD, utilisation et rétention azotée ne varient pas. Pendant l'administration de spirulines, nous notons un coefficient d'efficacité protéique élevé de 9,4 au lieu de 2,1 et 4,4 pendant les périodes témoins, mais il est sans signification car le nombre de cas est insuffisant et nous avons utilisé des périodes courtes de 4 à 5 jours, chez des adultes dénutris ayant des ingesta protéiques élevés.

Les bilans de sodium et de potassium ne varient pas quand on compare la période spiruline aux périodes témoins.

Moyenne de 5 bilans d'azote, de sodium et potassium.

AZOTE (g/24 h)	Nombre de cas	Ingéré (I)	Urinaire (U)	Fécal (F)	Bilan
Avant	(22)	22,4±1,02	13,25±0,79	1,33±0,09	+7,84±1,286
Spirulines	(22)	22,4±1,31	13,53±0,67	2,08±0,12	+6,81±1,473
Après	(15)	21,0±1,7	11,96±0,81	1,51±0,25	+7,53±1,879

	C.U.D. $\frac{\text{Ingéré - Fécal}}{\text{Ingéré}}$	Coeff. d'utilisat. $\frac{\text{Ingéré-(Fécal+Urin.)}}{\text{Ingéré}}$	Coeff. de rétent. $\frac{\text{Ingéré-(Fécal+Urin.)}}{\text{Ingéré - Fécal}}$
Avant	94,06 ± 0,59	31,89 ± 6,44	34,08 ± 7,09
Spirulines	90,94 ± 0,62	29,02 ± 6,67	31,87 ± 7,33
Après	92,00 ± 0,60	30,54 ± 6,79	33,78 ± 7,24

SODIUM (mEq/24 h)	Nombre de cas	Ingéré (I)	Urinaire (U)	Fécal (F)	Bilan
Avant	(22)	87,9±3,94	75,6±8,46	1,45±0,44	+10,8±9,19
Spirulines	(22)	110,2±7,79	71,0±6,96	5,2±3,49	+37,2±10,60
Après	(15)	82,2±4,42	52,3±8,11	1,19±0,26	+35,6±8,39
POTASSIUM (mEq/24h)					
Avant	(22)	96,5±6,26	58,2±4,42	11,4±1,46	+26,9±7,85
Spirulines	(22)	113,8±8,29	66,5±5,55	13,7±1,51	+34,1±10,15
Après	(15)	106,6±12,69	70,1±7,20	14,3±1,71	+19,7±14,53

Différence très significative $p \leqslant 0,001$ de la période "spirulines" par rapport aux périodes "avant" et "après".

III - Conclusion.

La rétention azotée est satisfaisante mais la digestibilité diminue par l'élévation de l'azote fécal qui peut être en rapport avec la présence de glucides peu digestibles.

L'acide urique urinaire ne varie pas significativement, l'acide urique sanguin augmente légèrement de 9 mg/1000 durant l'ingestion de spirulines ou la post-période.

Une administration prolongée de spirulines, à des quantités moindres, ne devrait pas, chez le sujet normal, modifier le métabolisme nucléo-protéique.

C O N C L U S I O N

-oOo-

Les Spirulines ne peuvent être considérées comme un nouveau produit alimentaire, étant donné qu'elles sont consommées par certaines tribus du Tchad depuis des temps immémoriaux.

Actuellement deux dossiers sont déposés en France au Service de la répression des fraudes pour permettre la commercialisation des produits obtenus.

Dans notre pays, le développement de cette culture a un intérêt politique et économique :

Politique : la culture des Spirulines ne peut s'effectuer que dans certains territoires et départements d'outre-mer (Antilles françaises). Ainsi une exploitation fonctionne déjà à la Martinique ; la réalisation de ces cultures sur place, la création d'emplois qu'elles apportent sont des facteurs qui contribuent au maintien de la population locale et au développement de cette région économiquement défavorisée.

Economique : dans la mesure où elle permet de diminuer un peu la dette commerciale extérieure.

Au niveau de l'alimentation humaine, une utilisation possible des Spirulines est l'incorporation des farines dans les aliments pour bébés. Pour certains pays en voie de développement, le remplacement du lait sec écrémé importé, par des Spirulines, serait un avantage certain. L'utilisation de ces algues comme complément protéique en diététique pour adultes et enfants, est aussi envisageable ; l'incorporation se faisant au niveau des préparations culinaires avec des algues brutes ou de préférence décolorées.

En ce qui concerne l'alimentation animale, elles peuvent être incorporées dans les aliments des porcs ou des volailles. Mais, si nous avons vu que les Spirulines (Sp. maxima et Sp. platensis) sont apparemment dépourvues de toute toxicité, leur incorporation à forte dose dans un régime est à exclure à cause d'une baisse de la digestibilité. Nous voyons l'intérêt d'utiliser les Spirulines à la fois comme source de protéines et comme source de pigments dans les aliments composés des animaux. Soit brutes, soit en deux parties, d'une part un composé très riche en protéines, d'autre part des pigments pour remplacer les pigments synthétiques jaunes et rouges dont le prix de revient est très élevé.

Les colorants extraits au cours des traitements de décoloration sont très prisés, en effet, les xanthophylles et également le colorant bleu contenu dans les Spirulines peuvent être utilisés en alimentation humaine et en pharmacie. Ces produits naturels pourraient aisément remplacer les colorants synthétiques dont la vente fut suspendue en janvier 1977.

C'est la vente de ces substances qui permet d'équilibrer les coûts de production ; en effet, les protéines issues de Spirulines sont cédées au cours moyen du soja, et les prix des colorants sont fonction du prix de vente du résidu.

C'est toujours la présence de ces colorants qui a ouvert un marché original au Japon ; la présence de nombreuses carpes d'agrément élevées pour des concours de "beauté" a montré que l'utilisation des Spirulines dans leur alimentation permettait l'obtention de couleurs et de reflets particulièrement chatoyants ; le marché pour cette seule utilisation est évalué à environ mille tonnes par an.

Vu : Le Professeur de l'Ecole Vétérinaire
rapporteur

Professeur R. FALIU

Vu : Le Directeur de l'Ecole
Vétérinaire

Professeur R. LAUTIE

Vu : Le Président de la Thèse

Professeur ECALLE

VU ET PERMIS D'IMPRIMER
Toulouse, le 2 Avril 1982

Le Président de l'Université
Paul Sabatier

Professeur D. BANCEL

B I B L I O G R A P H I E

-oOo-

1 - AZANOV P.L. - Soderzanie belka i ego Frakcij v syvororke svinej pri dobavleniiv racion chlorelly - Content of protein and its fractions in the blood serum piglets given supplements of chlorella, Uzb. Biol. z. 1969, 6, 51-52 cité dans Nutr. Abst. Rev., 1969, 41, 6716.

2 - BARON - Etude de la décoloration des Spirulines ; Annales de la nutrition et de l'alimentation, 1976, vol. 29, n° 6, 615-622.

3 - BERTRAM J.F., HUDSON & KATIS G. - The lipids of the algua Spirulina - J. Scientific of Food and Agriculture, 1965, 25, 759-763.

4 - BLUM J.C., CALET C. et GUILLAUMIN S. - Valeur alimentaire des algues Spirulines pour la poule pondeuse - Ann. Nutr. Alim., 1976, 30, 675-682.

5 - BLUM J.C. et CALET C. - Valeur alimentaire des algues Spirulines pour la croissance du poulet de chair - Ann. Nutr. Alim., 1976, 30, 651-674.

6 - BORIES G. et TULLIEZ J. - Détermination du 3-4, benzopyrène dans les algues Spirulines produites et traitées suivant différents procédés - Ann. Nutr. Alim., 1976, 29, 573-576.

7 - BOUDENE Cl., COLLAS E., JENKINS C. - Recherche et dosage de divers toxiques minéraux dans les algues Spirulines de différentes origines, et évaluation de la toxicité à long terme chez le rat d'un lot de Spirulines de provenance mexicaine - Ann. Nutr. Alim., 1976, 30, 577-588.

8 - BURLACU G., PARASCHIV M., SALAGEANU N., BALTAC M., IONILA D. - Rev. Roum. Biol., 1971, 16, 65-72.

9 - CLEMENT G. - Production et constituants caractéristiques des algues Spirulina platensis et maxima - Ann. Nutr. Alim., 1975, 29, 477-488.

10 - CLEMENT G. - Une nouvelle ressource : l'algue Spiruline - Bulletin de la société phylocologique de France, 1978, 23, 51-61.

11 - CLEMENT G. - Une nouvelle algue alimentaire : la Spiruline - Revue de l'institut Pasteur de Lyon, 1971, t.4, n°2, 103-114.

12 - CLEMENT G.,REBELLER, TRAMBOUZE - Utilisation massive du gaz carbonique dans la culture d'une nouvelle algue alimentaire - Revue de l'I.F.P. et annales des combustibles liquides, mai 1968, vol. XXIII, n° 5, réf. 15 900.

13 - DELPEUCH F., JOSEPH A., GAVELIER C. - Consommation alimentaire et apport nutritionnel des algues bleues (Oscillatoria platensis) chez quelques populations du Kanem (Tchad)- Ann. Nutr. Alim., 1976, 29, 497-516.

14 - FARRAR - Tecuitlalt ; a giimpse of aztec food technology - Nature, 23 July 1966, vol. 217, 341-342.

15 - FEVRIER C , SEVE B. - Essais d'incorporation de Spiruline, Spirulina maxima dans les aliments des porçins - Ann. Nutr. Alim., 1976, 29, 625-650.

16 - FORIN M.C., MAUME, BARON C. - Biochimie cellulaire : présence de squalène et de stérols dans une cyanophycée : la Spiruline - C.R. Académie des Sciences Paris, 1975, t. 281 (21 juillet) série D, 195-198.

17 - FORIN M.C. - Thèse doctorat 3ème cycle, Dijon, 20 nov.1973.

18 - GENERAL ELECTRIC CORPORATE RESEARCH and DEVELOPMENT - Culture de Pseudomonas.

19 - GUERIN-DUMARTRAIT E., MOYSE A. - Caractéristiques biologiques des Spirulines - Ann. Nutr. Alim., 1976, 30, 489-496.

20 - GUERRIN R. - Nouvelles protéines et produits de remplacement utilisables en alimentation animale - O.C.D.E., 1978, rapport 40-334.

21 - I.F.P. 1970 - Rapport au comité consultatif des protéines OAA/OMS/FISE. Etat d'avancement du procédé de l'I.F.P. de production d'algues, lère partie (1970), réf. 18 730-IF.

22 - JACQUET J. - Microflore des préparations de Spirulines - Ann. Nutr. Alim., 1976, 29, 589-601.

23 - KEE Mc. and CTIP - Special issue on single cell protein.

24 - MANDEL, TRAVNICEK - Biol. Chem. Vyz Zoirat, 1965, 1, 319-328.

25 - MEYER C. - Etude d'une culture d'algues en vue d'une production à grande échelle - Ind. Alim. Agr., 1969, 11, 1445-1449.

26 - NICHOLS B.W. and WOOD B.J.B. - The occurence and biosynthesis of gamma-Linolenic Acid in a Blue-Green Alga, Spirulina platensis - Lipids, january 1968, vol. 3, n° 1, 46-59.

27 - NOEMI G., MARTINEZ NADAL - Antimicrobial activity of Spirulina maxima - International congress of microbiology, august 1970, Mexico.

28 - NOEMI G., MARTINEZ NADAL - Sterol of Spirulina maxima - Phytochemistry, 1971, vol. 10, 2537-2538.

29 - NOEMI G., MARTINEZ NADAL - Carbohydrates of Spirulina maxima. 8ème international congress of chemotherapy, 28 august 1973, Athènes.

30 - QUILLET M. - Recherches sur les substances glucidiques élaborées par les algues Spirulines - Ann. Nutr. Alim., 1975, 29, 553-561.

31 - SAUTIER C., TREMOLIERES J. - Valeur alimentaire des algues Spirulines chez l'homme. - Ann. Nutr. Alim., 1976, 30, 517-534.

32 - SEVE B., AUMAITRE A., TORD B. - Ann. Zootech., 1975, 24 (1), 21-42.

33 - SOLOV'EVA Z.K. - Filloforu-v raciony svinej (Phyllophora for pigs). Svinovodstve, 1965, n° 11, 38-39, d'après Nutr. Abstr. Rev., 1866, vol. 36, n° 3, 5241.

34 - T.N.O. - Zeist, Hollande, rapport 3193, 1970.

35 - TULLIEZ J., BORIES G., BOUDENE C. et FEVRIER C. - Les hydrocarbures des algues Spirulines : nature, étude du devenir de l'heptadecane chez le rat et le porc - Ann. Nutr. Alim., 1975, 29, 563-572.

36 - VERMOREL M., TOULLEC G., DUMOND D. et PION R. - Valeur énergétique et protéique des algues bleues Spirulines supplémentées en acides aminés : utilisation digestive et métabolique par le rat en croissance - Ann. Nutr. Alim., 1975, 29, 535-552.

37 - WITT M., SCHROEDER J., MEHDEN H. - ZÜchtungskunde, 1962, 34, 272-281.

38 - WITT M., SCHROEDER J. - Landwirtsh Forsch, 1967, 20, 148-156.